

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

**FAKULTA STROJNÍ**

**Katedra strojírenské technologie  
Oddělení tváření kovů a plastů**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Martin Janeba**

**2013**

# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

## Fakulta strojní

Studijní program M2301 – Strojní inženýrství

Strojírenská technologie  
zaměření tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie  
Oddělení tváření kovů a plastů

**Technologie výroby plastových dílů s bionickým dezénem**

**Production technology of plastic parts with bionic relief**

Martin Janeba  
**KSP – TP –**

Vedoucí diplomové práce: Prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld – TU v Liberci

Konzultant diplomové práce: Doc. Dr. Ing. Dora Kroisová – TU v Liberci  
Ing. Martin Borůvka – TU v Liberci

### **Rozsah práce a příloh:**

<b>Počet stran</b>	<b>73</b>
<b>Počet tabulek</b>	<b>28</b>
<b>Počet obrázků</b>	<b>42</b>
<b>Počet vzorců</b>	<b>10</b>

Datum 24. 5. 2013



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Jméno a příjmení **Martin J A N E B A**

Studijní program **M2301 Strojní inženýrství**

Studijní obor **2303T002 Strojírenská technologie**

Zaměření **Tváření kovů a plastů**

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje diplomová práce na téma:

### **Technologie výroby plastových dílů s bionickým dezénem**

#### **Zásady pro vypracování:**

(uveďte hlavní cíle diplomové práce a doporučené metody pro vypracování)

1. Rešerše současného stavu aplikace přírodních reliéfů u plastových dílů.
2. Výběr bionického dezénu pro vstřikování plastů.
3. Výroba zkušebních těles s rozdílným typem polymeru.
4. Hodnocení povrchových vlastností bionických dezénů (smáčivost).
5. Vyhodnocení a diskuze výsledků.





Forma zpracování diplomové práce:

- průvodní zpráva: v rozsahu cca 50 stran
- grafické práce: grafy, tabulky

Seznam literatury (uveďte doporučenou odbornou literaturu):

- [1]BHUSHAN, Bharat. Biomimetics: lessons from nature – an overview. In: Phil. Trans. R. Soc. A 367 [online]. Royal Society Publishing, 2009, 1445–1486 [cit. 2012-02-03]. DOI: 10.1098/rsta.2009.0011. Dostupné z: <http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/367/1893/1445.full.pdf+html>.
- [2]KOCH, Kerstin, Bharat BHUSHAN a Wilhelm BARTHLOTT. Multifunctional surface structures of plants: An inspiration for biomimetics. In: *Progress in Materials Science, Volume 54, Issue 2*. Elsevier B.V., 2009, 137–178. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2008.07.003. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0079642508000704>.
- [3]Wetting. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001– [cit. 2012-02-03]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Wetting>.
- [4]Cohesion, Adhesion, Spreading, and Surfactants. In: *Wilkes University* [online]. Wilkes-Barre [cit. 2012-02-03]. Dostupné z: <http://pharmacy.wilkes.edu/kibbeweb/lecture3.html>.
- [4]Bartovská Lidmila, Šišková Marie: *Fyzikální chemie povrchů a koloidních soustav* [online]. Version 1.0. Praha : VŠCHT Praha, 2005 [cit. 2012-02-03]. Available from [www: <http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid\\_isbn-80-7080-579-X/pages-img/obalka-1.html>](http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_isbn-80-7080-579-X/pages-img/obalka-1.html). ISBN 80-7080-579-X.

Vedoucí diplomové práce: prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld

Konzultant diplomové práce: doc. Dr. Ing. Dora Kroisová

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld  
vedoucí katedry



doc. Ing. Miroslav Malý, CSc.  
děkan

V Liberci dne 15. 2. 2013

Platnost zadání diplomové práce je 15 měsíců od výše uvedeného data (v uvedené lhůtě je třeba podat přihlášku ke SZZ). Termíny odevzdání diplomové práce jsou určeny pro každý studijní rok a jsou uvedeny v harmonogramu výuky.





# **ANOTACE**

## **TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

### **Fakulta strojní**

#### **Katedra strojírenské technologie**

#### **Oddělení tváření kovů a plastů**

Studijní program: M2301 – Strojní inženýrství  
Diplomant: Martin Janeba  
Téma práce: Technologie výroby plastových dílů s bionickým dezénem  
Production technology of plastic parts with bionic relief

Číslo DP: KSP – TP –  
Vedoucí DP: Prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld – TU v Liberci  
Konzultant DP: Doc. Dr. Ing. Dora Kroisová – TU v Liberci  
Ing. Martin Borůvka – TU v Liberci

#### **Abstrakt:**

Diplomová práce se zabývá problematikou aplikace přírodních reliéfů u plastových dílů. V práci je popsána technologie výroby zkušebních vzorků s vybraným bionickým dezénem a dále jsou hodnoceny povrchové vlastnosti zkušebních vzorků pomocí kontaktního úhlu smáčení. Hodnocení povrchových vlastností bylo provedeno vzhledem k použitým měřicím kapalinám a polaritě polymerů. Teoretická část práce pojednává o problematice smáčení pevných povrchů, technologii vstřikování plastů a bionických povrchů.

#### **Abstract:**

The diploma work deals with problems of application natural relief on plastic parts. In thesis, manufacturing technology production of the test specimen with chosen bionic relief is described. Further, surface characteristics by measuring contact wetting angle are evaluated. Evaluation of surface characteristics was performed due to the applied measuring liquids and polarity of polymers. The theoretical part deals with the problems of wetting of solid surfaces, injection moulding technology and bionic surfaces.

**Místopřísežné prohlášení:**

Místopřísežně prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury.

V Liberci, 24. května 2013

.....  
Martin Janeba  
U Libeňského pivovaru 1614  
18000 Praha

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Prof. Dr. Ing. Petru Lenfeldovi a Ing. Martinu Borůvkovi za cenné připomínky, rady a pomoc při vypracování této práce.

# Obsah

<b>Obsah.....</b>	<b>- 8 -</b>
<b>Seznam použitých zkratk a symbolů .....</b>	<b>- 10 -</b>
<b>1 ÚVOD .....</b>	<b>- 12 -</b>
<b>2 TEORETICKÁ ČÁST .....</b>	<b>- 14 -</b>
2.1 Polymerní materiály .....	- 14 -
2.1.1 Rozdělení plastů.....	- 14 -
2.1.2 Molekulární struktura plastů.....	- 15 -
2.1.3 Primární a sekundární vazebné síly .....	- 16 -
2.1.4 Nadmolekulární struktura a vlastnosti plastů.....	- 18 -
2.1.5 Složení plastů.....	- 19 -
2.2 Vstřikování termoplastů .....	- 20 -
2.2.1 Vstřikovací cyklus .....	- 20 -
2.2.1.1 Dávkování a plastikace materiálu v tavící komoře .....	- 21 -
2.2.1.2 Vstřík taveniny do dutiny formy .....	- 21 -
2.2.1.3 Tlaková špička a dotlak hmoty ve formě .....	- 22 -
2.2.1.4 Chladnutí ve formě.....	- 23 -
2.2.1.5 Vyhození výstříku z formy .....	- 23 -
2.2.2 Konstrukční provedení vstřikovacích strojů .....	- 24 -
2.2.3 Vstřikovací forma .....	- 25 -
2.2.3.1 Tvarová dutina .....	- 26 -
2.2.3.2 Temperační systém .....	- 26 -
2.2.3.3 Vtokový systém.....	- 26 -
2.2.3.4 Vyhazovací systém .....	- 27 -
2.3 Bionika .....	- 27 -
2.3.1 Listy lotosu a jejich biomimetická tvorba.....	- 28 -
2.3.2 Rýžové listy a jejich biomimetická tvorba .....	- 29 -
2.3.3 Okvětní lístky růže červené a jejich bionická tvorba.....	- 30 -
2.3.4 Šupiny ryb a jejich bionická tvorba .....	- 32 -
2.3.5 Jiné typické víceúčelové bio-inspirované materiály .....	- 33 -
2.3.6 Metody výroby nano, mikro a hierarchické struktury .....	- 34 -
2.4 Hydrofilita a hydrofobicita .....	- 34 -

2.4.1 Adheze .....	- 35 -
2.4.2 Koheze .....	- 35 -
2.5 Smáčivost .....	- 36 -
2.5.1 Kontaktní úhel smáčení .....	- 36 -
2.5.1.1 Fáze, fázová rozhraní .....	- 37 -
2.5.2 Kapka kapaliny na povrchu pevné látky .....	- 37 -
2.5.3 Wenzelův stav (teorie) .....	- 39 -
2.5.4 Cassiův stav (teorie) .....	- 40 -
2.5.5 Přechod mezi Cassieho a Wenzelovým stavem .....	- 41 -
2.5.6 Hystereze kontaktního úhlu .....	- 42 -
<b>3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....</b>	<b>- 43 -</b>
3.1 Výběr jednotlivých druhů polymerů .....	- 43 -
3.1.1 Základní charakteristika PP MOSTEN MA 350 .....	- 43 -
3.1.2 Základní charakteristika ABS NOVODUR 4105 .....	- 44 -
3.1.3 Základní charakteristika PA6 GRODNAMID .....	- 45 -
3.2 Vstřikovací forma .....	- 47 -
3.3 Volba vstřikovacího stroje .....	- 49 -
3.4 Technologické parametry výroby zkušebních těles vstřikováním .....	- 50 -
3.5 Měření povrchových vlastností .....	- 55 -
3.5.1 Zvolené kapaliny .....	- 55 -
3.5.2 Měření kontaktního úhlu smáčení metodou sedící kapky .....	- 56 -
3.5.3 Softwarové rozhraní (SEE System) a naměřené hodnoty .....	- 57 -
<b>4 VYHODNOCENÍ A DISKUZE VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>- 64 -</b>
4.1 Vyhodnocení povrchů smáčených vodou .....	- 64 -
4.2 Vyhodnocení povrchů smáčených glycerínem .....	- 66 -
4.3 Vyhodnocení povrchů smáčených etylenglykolem .....	- 68 -
4.4 Vyhodnocení vlastností povrchů jednotlivých materiálů .....	- 69 -
<b>5 ZÁVĚR .....</b>	<b>- 72 -</b>
<b>Seznam použité literatury .....</b>	<b>- 73 -</b>

## Seznam použitých zkratk a symbolů

ABS	Akrylonitril-butadien-styren
AFM	Atomic force microscopy
Ag	Stříbro
C	Uhlík
CCD	Charge-Coupled Device
CVD	Chemical vapor deposition
EHD	Electrohydrodynamics
H	Vodík
H <sub>2</sub> O	Destilovaná voda
HCl	Kyselina chlorovodíková
–CH <sub>2</sub> –	Methylen
i-PP	Izotaktický polypropylen
N	Dusík
O	Kyslík
PA	Polyamid
PC	Polykarbonát
PE	Polyetylén
PMMA	Polymethylmetakrylát
PP	Polypropylén
PS	Polystyrén
PTFE	Polytetrafluóretlén
PVA	Polyvinylalkohol
p-v-T	Tlak – měrný objem – teplota (diagram p-v-T)
SEE SYSTEM	Surface Energy Evalution System
SEM	Scanning electron microscopy
UV	Ultrafialové záření
$f_g$ [-]	Zastoupení plynné frakce na povrchu
$f_s$ [-]	Zastoupení pevné frakce na povrchu
H [°]	Hystereze kontaktního úhlu smáčení
P [Pa]	Tlak
r [μm]	Drsnost povrchu
T [°C]	Teplota

$T_f$	[°C]	Teplota zesklenní
$T_m$	[°C]	Teplota tání
$v$	[cm <sup>3</sup> ·g <sup>-1</sup> ]	Měrný objem
$W_a$	[J]	Adhezní práce
$W_k$	[J]	Kohezní práce
$\gamma_{lg}$	[mN·m <sup>-1</sup> ]	Povrchové napětí na rozhraní kapalně a plynné fáze
$\gamma_{ls}$	[mN·m <sup>-1</sup> ]	Povrchové napětí na rozhraní kapalně a pevné fáze
$\gamma_{sg}$	[mN·m <sup>-1</sup> ]	Povrchové napětí na rozhraní pevné a plynné fáze
$\theta$	[°]	Kontaktní úhel smáčení
$\theta_A$	[°]	Postupující kontaktní úhel smáčení
$\theta_C$	[°]	Kontaktní úhel smáčení podle Cassia
$\theta_R$	[°]	Ustupující kontaktní úhel smáčení
$\theta_W$	[°]	Kontaktní úhel smáčení podle Wenzela

# 1 ÚVOD

Historikové již tradičně pojmenovávají jednotlivé epochy dějin lidstva podle nejcharakterističtějšího materiálu, který je v dané době používán. Rozlišujeme tedy například dobu kamennou, dobu bronzovou, nebo dobu železnou. Vzhledem k tomu, že ve 20. století začal rozvoj syntetických polymerů a v průběhu 21. století zaujímají polymery přibližně  $\frac{3}{4}$  objemu spotřeby mezi všemi na světě vyráběnými materiály, můžeme dobu, v níž právě žijeme, označit jako dobu polymerní [1].

Původně byly polymery používány na málo náročné aplikace, ale s rozšiřujícími se lidskými znalostmi začaly postupně pronikat i do pokročilé technické sféry. Příčiny rychlého zvyšování spotřeby i výroby plastů pocházejí z vlastností těchto materiálů, kterými často předčí materiály klasické, tj. kovy, keramiku, sklo či dřevo. K hlavním přednostem ve srovnání s ostatními materiály patří jejich výborná zpracovatelnost, kdy je na jejich výrobu a následné zpracování potřeba vynaložit mnohem méně energie i práce než na kovy. Dále jejich hmotnost, která je až osmkrát nižší než u oceli, nižší teploty zpracování, jejich syntetická výroba z levných a snadno dostupných surovin a malé procento materiálového odpadu. Na druhé straně mají však polymery i určité nevýhody, mezi které patří zejména jejich menší pevnost, nižší tepelná odolnost a kříp. Tyto vlastnosti se ale dají do značné míry potlačit přidáním různých přísad.

Plasty se tak díky svým výborným vlastnostem staly nedílnou součástí technické praxe a patří mezi nejmodernější konstrukční materiály. Výroba plastů se stále zvyšuje a rozšiřují se oblasti jejich aplikací. Těžko bychom hledali odvětví, v němž se syntetické polymery vůbec nepoužívají. I přesto, že v dnešní době existuje přes několik tisíc druhů plastů, rozhodující podíl má jen několik desítek druhů. U těchto plastů se vývoj zastavil, dále se nepředpokládá objev polymeru, který by se stal konkurencí již známým typům plastů masové výroby [2].

V oblasti přípravy polymerů se proto úsilí zaměřuje na zlepšení fyzikálně-mechanických a zpracovatelských vlastností stávajících typů. Nové druhy plastů nacházejí použití při řešení speciálních technických problémů. Další vývoj polymerních materiálů můžeme dělit do dvou hlavních směrů. Na jedné straně vývoj umožňující další zdokonalení a zlevnění masové výroby komoditních polymerů a výroba plastů se specifickými vlastnostmi jednotlivých aplikací. Na druhé straně je snaha o připravování nových typů speciálních polymerů, zejména pro elektronické,



biologické a medicínské aplikace a také nová extrémně pevná a teplotně odolná vlákna. Intenzivně se pracuje na vývoji plastů odolávajících vysokým teplotám, elektricky vodivých plastech, nebo na odbourávání polymerů biologickou cestou [2], [3].

V poslední době začíná hrát významnou roli při výrobě plastových dílů také bionika. V přírodě se nachází obrovská škála specifických vlastností, systémů a materiálů, kterým se začíná věnovat pozornost. Nejvýznamnější z nich jsou například superhydrofilita, superhydrofobicita, snížení odporu proti proudění kapalin i plynů dané povrchovou strukturou, samočištění, zvýšená adheze, reverzní adheze, vlákna s vysokou mezí pevnosti, antireflexní povrchy atd. Pochopení a napodobení těchto jevů má pro průmysl zásadní význam. Tyto jevy mohou být vhodně napodobeny a následně aplikovány například na povrchy v automobilovém průmyslu, v letectví, ale i na oblečení, nebo běžné spotřební zboží [4].

Cílem této diplomové práce je popsat technologii výroby plastových dílů s bionickým dezénem. V práci byla popsána technologie výroby zkušebních vzorků s vybraným bionickým dezénem analogickým k povrchu přírodního mechu. Teoretická část práce představuje některá základní dělení polymerů, vysvětluje technologii vstřikování plastů a pojednává o problematice bionických reliéfů a smáčení pevných povrchů. Experimentální část zahrnuje výrobu zkušebních těles a laboratorní měření povrchových vlastností pomocí kontaktního úhlu smáčení. Hodnocení bylo provedeno vzhledem k použitým měřicím kapalinám a polaritě vybraných polymerů.

Tato diplomová práce vznikla v rámci řešení projektu studentské grantové soutěže (SGS 28005) na základě podpory specifického vysokoškolského výzkumu na TUL.

## 2 TEORETICKÁ ČÁST

### 2.1 Polymerní materiály

Polymery jsou synteticky připravované makromolekulární látky. Při jednoduchých chemických reakcích, které se mnohokrát opakují, přechází původní nízkomolekulární sloučenina monomer, ve vysokomolekulární látku zvanou polymer. Plastem se polymer stává poté, co ho smícháme s nezbytnými přísadami a převedeme do formy vhodné k dalšímu technologickému zpracování (např. granule, prášek, tablety atd.). Obecný termín polymer představuje chemickou látku, zatímco plast je technický materiál [5].

#### 2.1.1 Rozdělení plastů

Plasty se dají dělit podle mnoha různých hledisek. V této diplomové práci se budeme zabývat technologií výroby vstřikováním, proto je vhodné zmínit rozdělení na základě teplotního chování. Plasty tak podle chování dle teploty dělíme na termoplasty, reaktoplasty a elastomery.

**Termoplasty** - jedná se o polymerní materiály, které při zahřívání přecházejí do plastického stavu, do stavu vysoce viskózní taveniny, kde se mohou snadno tvářet a zpracovávat. Po ochlazení přejdou opět do tuhého stavu. Pod teplotu tání  $T_m$  (semikrystalické plasty), nebo teplotu viskózního toku  $T_f$  (amorfní plasty). Protože se chemická struktura plastu při zahřátí nemění, nastávají pouze fyzikální změny, lze proces měknutí a následného tuhnutí opakovat teoreticky bez omezení. K termoplastům patří většina zpracovávaných hmot, jako je polyethylen, polypropylen, polystyren, polyvinylchlorid, polyamid, atd.

**Reaktoplasty** - jedná se o polymerní materiály, které rovněž v první fázi zahřívání měknou a lze je tvářet, avšak jen omezenou dobu. Během dalšího zahřívání dochází k chemické reakci – vytvrzování. Vyšší teplota umožní vznik vnitřní struktury, tzv. prostorovému zesíťování. Tento děj je nevratný a vytvrzené plasty nelze roztavit ani rozpustit, dalším zahříváním dojde k rozkladu hmoty (degradaci). Mezi reaktoplasty patří různé typy syntetických pryskyřic (polyesterové, epoxidové, fenolformaldehydové, apod.)

**Elastomery** - jedná se o polymerní materiály, které rovněž v první fázi zahřívání měknou a lze je tvářet. Během dalšího zahřívání však dochází k chemické reakci – vulkanizaci. U elastomerů na bázi termoplastů nedochází ke změnám chemické struktury, proces měknutí a následného tuhnutí lze opakovat teoreticky bez omezení, probíhá zde pouze fyzikální děj [2], [5].

S ohledem na zaměření této diplomové práce je pro nás důležité dělení plastů podle polarit na polární a nepolární.

**Nepolární polymery** – nemají trvalý dipól, jsou nenavlhavé. Mohou přijímat vodu pouze povrchově, ne objemově. Patří sem například polyethylen, polypropylen, styrenové plasty, polytetrafluoretylen.

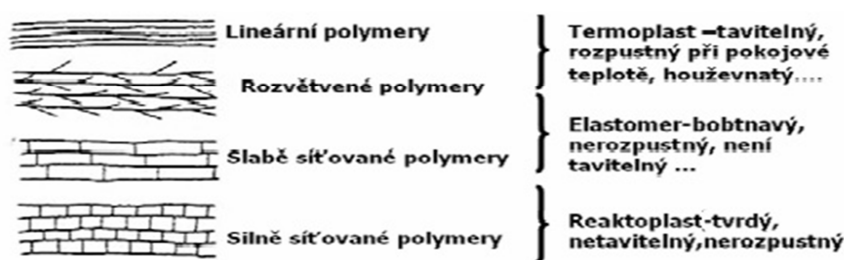
**Polární polymery** – mají trvalý dipól, jsou navlhavé, absorbují vodu i do svého objemu a před zpracováním je potřeba je vysušit. Nejvíce navlhavý zástupce je polyamid. Obecně jsou hodně navlhavé polární plasty, které mají hydrofilní skupiny v makromolekule (-OH-, -COOH-, -NH-, -O-). Voda působí na polymery jako změkčovaadlo, což má za následek snížení mechanických vlastností [6].

### 2.1.2 Molekulární struktura plastů

Podstatou polymerů je makromolekulární látka přírodního, nebo syntetického původu. Molekulární struktura zahrnuje výstavbu makromolekulárního řetězce z monomerních jednotek. Základním prvkem řetězce je atom uhlíku. Uhlíkové atomy mají schopnost vzájemně se vázat a vytvářet tak dlouhé řetězce. Existují tři druhy polymerních makromolekul: lineární, rozvětvené a zesíťované (viz. Obr. 2.1).

- **Lineární (přímé) makromolekuly** vznikají v případě, že se monomerní molekuly řadí jedna vedle druhé. Lineární makromolekuly se mohou z prostorových důvodů více přiblížit jedna ke druhé a vyplnit tak kompaktněji prostor. Polymery pak mají vyšší hustotu. Lineární makromolekuly snáze vytvářejí prostorově pravidelné shluky krystalických struktur, takže tyto polymery mají vyšší obsah krystalických podílů. Jsou obvykle dobře rozpustné a tavitelné, v tuhém stavu se vyznačují houževnatostí a ve formě tavenin dobrou zpracovatelností.

- **Rozvětvené makromolekuly** mají na základním řetězci boční větve. Rozvětvené makromolekuly se na rozdíl od lineárních nemohou jedna ke druhé dostatečně přiblížit, protože tomu tyto boční větve zabraňují. Mají proto nižší hustotu. Uspořádanost jejich shluků je nízká a hůře krystalizují. Rozvětvení zhoršuje jak pohyblivost makromolekul, což má za následek horší tekutost v roztaveném stavu, tak oddálení makromolekul, které snižuje mezimolekulární síly a zhoršuje tak většinu mechanických vlastností.
- **Zesít'ované makromolekuly** vytvářejí prostorovou síť, kdy je několik přímých, nebo rozvětvených makromolekulárních řetězců mezi sebou propojeno vazbami, takže vytvářejí jednu takřka nekonečnou makromolekulu. Taková struktura vede ke ztrátě tavitelnosti a rozpustnosti polymeru [1], [2], [5].



Obr. 2.1 Makromolekulární řetězce [5]

### 2.1.3 Primární a sekundární vazebné síly

Síly v polymerních materiálech jsou dvojí – primární a sekundární.

**Primární (intramolekulární)** síly působí uvnitř jedné makromolekuly. Jsou to síly mezi jednotlivými atomy. Převažuje zde kovalentní vazba, což je sdílení jedno, dvou či tří elektronových párů ve valenčních sférách dvou sousedících atomů. Síly působí na velmi krátkou vzdálenost a jsou velmi silné. Čím větší makromolekula, tím jsou síly větší [6].

**Sekundární (intermolekulární)** síly, nazývají se také jako síly Van der Waalsovy. Je to vzájemné působení mezi atomy, molekulami nebo jinými částicemi a jsou vlastně příčinou existence pevných látek. Jejich podstatou je vzájemné působení molekulových dipólů jak stálých, tak indukovaných. Jsou velmi slabé, jejich velikost závisí na vzájemné vzdálenosti. Jedná se tedy o síly působící mezi nevázanými

atomy nebo molekulami a rozlišujeme:

**Dipólové interakce:** (interakce dipól – dipól) Nejsilnější interakce z Van der Waalsových vazeb, které se projevují zejména u polárních molekul ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{HCl}$ ). Podstatou je elektrostatické přitahování opačně nabitých pólů polárních molekul, tedy v podstatě interakce dvou permanentních dipólů. Ovlivňuje je teplota, vzdálenost makromolekul a dipólový moment.

**Indukční interakce:** (interakce dipól – indukovaný dipól) Tato interakce se uplatňuje tehdy, jestliže se dostane nepolární molekula do blízkosti polární molekuly. Elektrické pole polární molekuly ovlivní rozložení elektronů v nepolární molekule – polarizuje ji za vzniku indukovaného dipólu. Ten pak interaguje s dalšími dipóly popřípadě indukovanými dipóly.

**Disperzní interakce:** (interakce indukovaný dipól – indukovaný dipól) Nejslabší síly, které obvykle působí mezi nepolárními polymery. Jedná se vlastně o vzájemné interakce dočasných dipólů. Časově proměnný dipólový moment je způsobený neustálým pohybem elektronů kolem jádra. Nejsou závislé na teplotě.

Druhým druhem, po Van der Waalsových mezimolekulárních silách, jsou vazby s **vodíkovým můstkem**. Je to nejsilnější sekundární vazba, tvořící v podstatě přechod mezi vazbami primárními a sekundárními. Vzniká, když je atom vodíku současně sdílen dvěma silně elektronegativními atomy a každý z nich přísluší jedné makromolekule. Vyskytuje se například u polyamidu [1], [2], [6], [8].

Přítomnost stabilních dipólů v polymerech se projevuje tím, že jsou navenek polární. Tímto chováním se vyznačují zejména polymery s nesymetrickými molekulami, které obsahují atomy kyslíku a dusíku. Typickým příkladem jsou polyamidy, které vedle nepolárních skupin  $-\text{CH}_2-$  mají v molekule silně polární skupiny (C,O,N,H). Je-li naopak molekula symetrická a obsahuje dipóly stejného typu, polymer se navenek jeví jako nepolární. Příkladem je polyetylen, jehož molekula je složena pouze ze skupin  $-\text{CH}_2-$ . Polarita polymerů má značný význam pro spoustu jejich schopností, jako např. dielektrické vlastnosti, navlhavost, schopnost rozpouštět se, nebo bobtnat v nízkomolekulárních rozpouštědlech aj [7].

### 2.1.4 Nadmolekulární struktura a vlastnosti plastů

Je to stupeň uspořádanosti makromolekul, kdy lineární makromolekuly vytváří uspořádanější nadmolekulární strukturu, zesíťované makromolekuly strukturu neuspořádanou. Termoplasty tak mohou mít amorfní, nebo semikrystalickou nadmolekulární strukturu, zatímco reaktoplasty pouze strukturu amorfní. Vlastnosti polymerního materiálu jsou závislé na tvaru makromolekuly a na stupni krystalinity.

- **amorfní struktura:** Makromolekuly zaujímají zcela nahodilou pozici (chaotická struktura). Základním morfologickým útvarem této struktury jsou globuly (klubíčka) o velikosti  $10 \div 30$  nm. Pro amorfní plasty je charakteristická tvrdost, křehkost, pevnost. Jsou průhledné z důvodu nízkého indexu lomu (1,4 až 1,6). Podle propustnosti světla je můžeme dělit na čiré (92 % propustnosti), transparentní a průhledné (60 % propustnosti). Amorfní plasty lze použít pouze do teploty zesíťování  $T_g$ . Při teplotě nižší se látka chová jako tvrdé a křehké sklo, při vyšší teplotě má houževnaté kaučukovité chování. Patří sem například polystyrén (PS), polykarbonát (PC), polymethylmetakrylát (PMMA).
- **krystalická struktura:** Makromolekuly mají určitý stupeň uspořádanosti. Základním morfologickým útvarem jsou tzv. lamely, fibrily. U reálných výrobků se při tuhnutí z tavenin polymerů vytvářejí sférolity. Jedná se o shluky lamel, které vychází ze společného centra a rozrůstají se na všechny strany. Často jsou vrtulovitě stočené. Stupeň uspořádání se pohybuje od 40 do 90 % a vyjadřuje relativní podíl krystalických oblastí mezi amorfními. Hovoříme proto o semikrystalických polymerech. Jejich index lomu je vyšší než u amorfních, jsou mléčně zakalené. Pro semikrystalické plasty je charakteristická houževnatost, pevnost a modul pružnosti rostoucí se stupněm krystalinity. Použitelné jsou do teploty tání  $T_m$ . Patří sem například polyetylén (PE), polypropylén (PP), polyamid (PA), polytetrafluóretlén (PTFE).

**Stupeň krystalinity** – míra uspořádanosti ve struktuře, udává relativní podíl krystalických oblastí ve hmotě. Pro vznik semikrystalické struktury je nutná tvorba

krystalizačních zárodků (nukleace), na nichž poté rostou krystality. K nukleaci dochází při ochlazování taveniny, která má amorfni strukturu. Pod teplotou zeskenění  $T_g$  a nad teplotou tání  $T_m$  k nukleaci nedochází. Důležitá je také doba, kterou má polymer k dispozici. Chceme-li dosáhnout jemnozrnné struktury, musí krystalizace probíhat při teplotě, kdy se tvoří velké množství zárodků. Pro co nejlepší mechanické vlastnosti je nutné řídit krystalizaci ke vzniku jemnozrnné struktury a co nejvyššího stupně krystalinity. Prudké ochlazení povrchu způsobí, že polymer sice zkrystalizuje, ale nevytvoří sférolitickou strukturu.

**Primární krystalizace** – krystalizace, kdy polymer přechází ze stavu kapalného do stavu tuhého.

**Sekundární krystalizace** – pokračování krystalizace již v pevné fázi. Je nežádoucí, protože jsou s ní spojeny změny rozměru i vlastností výrobku.

Orientace makromolekul na povrchu vstřikovaného dílce je vlivem vysokých vstřikovacích sil ve směru toku taveniny (tzv. orientační textura), zatímco v jádru tělesa zůstávají molekuly déle v tekutém stavu a než ztuhnou, stačí se vrátit do neorientovaného stavu [1], [2], [5], [6].

### 2.1.5 Složení plastů

Plasty se dají dělit rovněž podle druhu přísad na plněné, či neplněné. U neplněných množství přísad neovlivňuje vlastnosti polymerní matrice. U plněných plastů nejčastěji hovoříme o složení ze tří základních složek, jimiž jsou pojivo, plnivo a přísady. Pojivem je vlastní makromolekulární látka, která určuje charakteristické vlastnosti plastů. Plnivem jsou různé organické, nebo anorganické látky (kaolin, křída, vápenec, grafit, práškové kovy, skleněná vlákna apod.), které podle druhu plní v plastech řadu funkcí. Mohou nahrazovat určitou část vlastního pojiva, nebo upravují vlastnosti plastu. Jsou ve formě prášku, částic nebo vláken. Přísady také upravují vlastnosti plastů. Jsou to například různé stabilizátory (zpomalují degradaci), maziva (usnadňují zpracování), barviva (dodávají barevný odstín), retardéry hoření (zpomalují proces hoření plastů), změkčovadla (zlepšují houževnatost), nadouvadla (zmenšují hmotnost) a jiné [2], [9].

Aditiva také ovlivňují navlhavost plastů. Pokud přidáme organická, celková navlhavost se nám zvýší, naopak u anorganických navlhavost klesá [6].

## 2.2 Vstřikování termoplastů

Vstřikování je definováno jako cyklický a diskontinuální proces zpracování termoplastických materiálů do finálního výrobku, nebo polotovaru. Výrobky zhotovené vstřikováním se vyznačují velmi dobrou rozměrovou i tvarovou přesností a vysokou reprodukovatelností mechanických a fyzikálních vlastností. Technologie vstřikování je nejrozšířenější technologií na zpracování plastů [5].

Dávka plastu je v roztaveném stavu vstřikována velkou rychlostí a pod tlakem, z pomocné tlakové komory do tvarové dutiny kovové formy, kde ztuhne a zaujme tvar požadovaného výrobku. Tlaková komora je součástí vstřikovacího stroje a zásoba vstřikovaného materiálu se v ní stále doplňuje během cyklu.

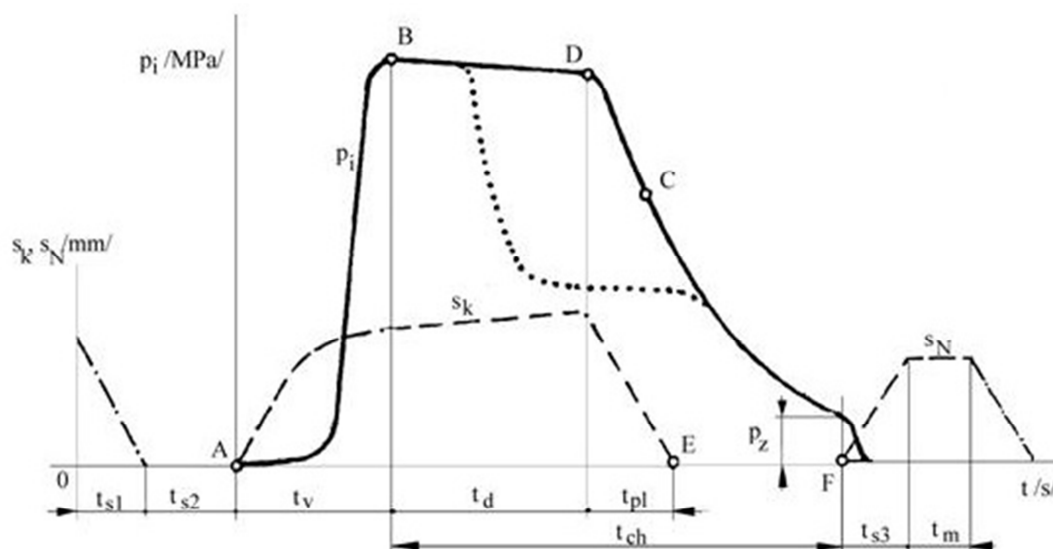
Výhody vstřikování jsou krátký čas cyklu, schopnost vyrábět složité součásti s dobrými tolerancemi rozměrů a velmi dobrou povrchovou úpravou, ale i konstrukční flexibilita, která umožňuje odstranění konečných úprav povrchu a montážních operací. Hlavní nevýhodou v porovnání s ostatními metodami zpracování plastů jsou vysoké investiční náklady, dlouhé doby nutné pro výrobu forem a potřeba používat strojní zařízení, které je neúměrně velké v porovnání s vyráběným dílem.

Vstřikováním lze zpracovávat téměř všechny druhy termoplastů. Výjimkou je např. polytetrafluoretylén. V omezené míře se vstřikují i některé reaktoplasty a elastomery. K nejčastěji vstřikovaným termoplastům patří polyolefiny, styrenové plasty a dále polyamidy, polykarbonáty, polyformaldehyd a další [2], [5], [6].

### 2.2.1 Vstřikovací cyklus

Vstřikovací cyklus tvoří sled přesně specifikovaných úkonů. Jedná se o proces, během něhož plast prochází teplotním cyklem. Při popisu vstřikovacího cyklu definujeme jeho počátek, za který lze považovat impuls k uzavření formy. Následuje plastikace materiálu v tavicí komoře, vstříknutí taveniny do dutiny formy, dotlak, chlazení polymeru ve formě a vyjmutí výstřiku z formy (viz. Obr. 2.2) [2].





Obr. 2.2 Průběh vnitřního tlaku  $p_i$  v dutině formy během procesu vstřikování.

A: začátek vstřikování, B: konec plnění formy, C: začátek dotlaku, D: konec dotlaku,  
E: konec plastikace, F: otevření formy

$s_K$  – pohyb šneku,  $s_N$  – pohyb formy,  $p_i$  – vnitřní tlak ve formě,  $t_{s1}$  – doba uzavření formy,  $t_{s2}$  – doba přisunu vstřikovací jednotky,  $t_v$  – doba vstřikování,  $t_d$  – doba dotlaku,  $t_{pl}$  – doba plastikace,  $t_{ch}$  – doba chlazení,  $t_{s3}$  – doba otevření formy,  $t_m$  – doba prodlevy [2]

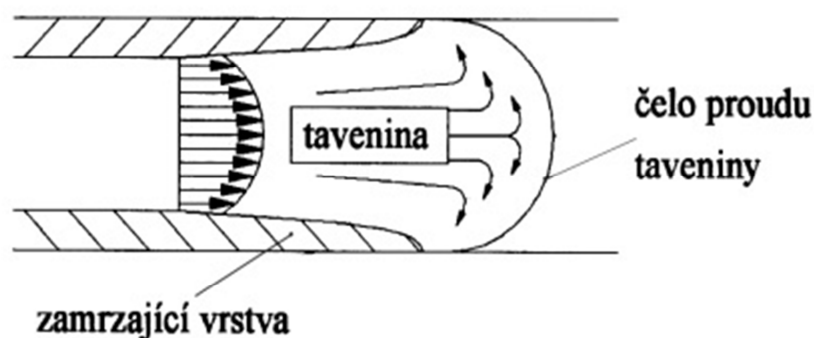
### 2.2.1.1 Dávkování a plastikace materiálu v tavící komoře

Dávkování představuje správně zvolenou vstřikovací dávku, která umožní naplnění dutiny formy a následné doplňování během smrštění. Cílem plastikace polymeru je vytvoření homogenní taveniny o požadované teplotě a viskozitě, která se shromáždí v prostoru před čelem šneku. Při plastikaci se šnek otáčí a současně posouvá směrem dozadu. Ohřev polymeru je realizován dvěma způsoby současně, a to příívodem tepla ze stěn tavného válce, kdy se používá elektrické odporové topení a frikčním teplem, které vzniká při pohybu šneku vlivem tření o stěny komory a povrch šneku. Vlivem smykového tření stále narůstá teplota taveniny. Nebezpečí při plastikaci představuje možná degradace plastu vlivem příliš rychlého ohřevu, která je závislá také na náchylnosti daného polymeru [2], [5].

### 2.2.1.2 Vstřik taveniny do dutiny formy

Při této fázi dochází k téměř celému zaplnění dutiny formy (98%) taveninou. Šnek se již neotáčí, ale funguje jako píst a celý proces je realizován pouze jeho

dopředným pohybem. Nejdůležitějšími parametry této fáze je doba a rychlost vstřikování a vstřikovací tlak. Vstřikovací rychlost se pro většinu výstřiků volí konstantní, pouze pro vstřikování složitějších dílů je vhodné vstřikovací rychlost naprogramovat (zvolit vhodný vstřikovací rychlostní profil). Doba plnění dutiny by měla být co nejkratší, protože při kontaktu taveniny se stěnami formy dochází k ochlazování a ztrátě tekutosti materiálu. Celková doba plnění dutiny se pohybuje maximálně v řádech sekund. Plnění formy je nutné řídit tak, aby tavenina proudila postupně tzv. laminárním tokem a ne volným tokem. Při laminárním plnění nastává postupné tuhnutí vrstev taveniny po kontaktu s chladnou stěnou formy a vzniká plastické jádro s vyšší rychlostí proudění, což má za následek dobré plnění tvarové dutiny a zakřivení čela toku (viz. Obr. 2.3). Tlak klesá směrem od jádra ke stěnám dutiny [2], [5].



*Obr. 2.3 Laminární tok taveniny plastu. [12]*

### **2.2.1.3 Tlaková špička a dotlak hmoty ve formě**

V okamžiku naplnění formy začíná stlačování taveniny a tím prudký nárůst tlaku ve formě. Nastává tlaková špička, kdy tento tlak převyšuje nastavenou hodnotu. Aby se zabránilo vysokému namáhání formy a deformaci výrobku (propadliny, staženiny apod.), je nutné přepnout vstřikovací tlak před dosažením tlakové špičky na dotlačovací. Při dotlačování je do formy dodáno ještě asi 10 % objemu materiálu, k vyrovnání smrštění. Tato fáze vstřikování má významný vliv na výsledné vlastnosti výstřiku.

Velmi důležitými parametry dotlaku jsou jeho velikost a doba trvání. Hodnota dotlaku obvykle bývá 40 – 60 % vstřikovacího tlaku. Příliš vysoká hodnota dotlaku zvyšuje opotřebení formy a energetickou náročnost procesu. Má také za následek

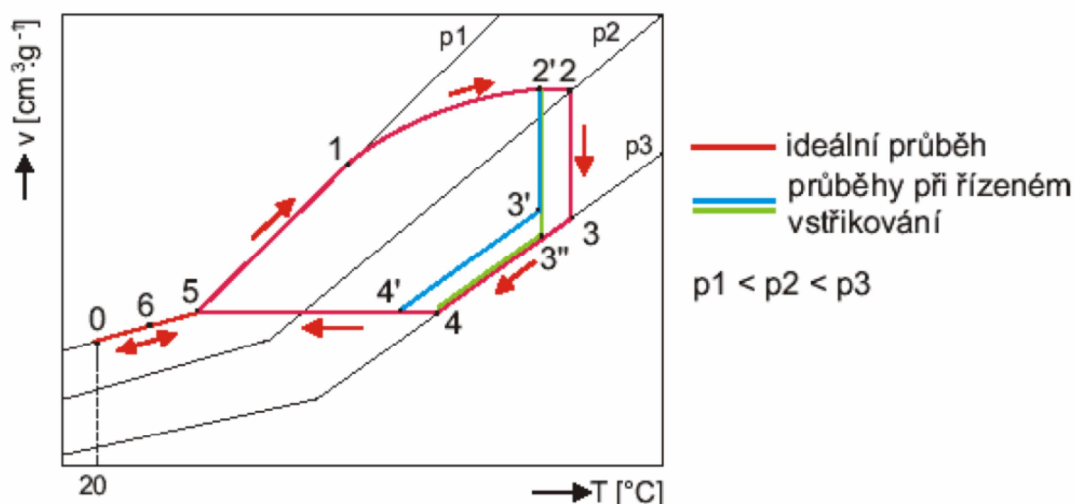
vyšší vnitřní pnutí výstřiku. Jestliže k přepnutí na dotlak dojde opožděně, zvýší se značně tlak ve formě a dojde k přeplnění formy. Dojde-li k přepnutí na dotlak naopak předčasně, je tlak taveniny ve formě nízký a to se projeví nižší hmotností a menšími rozměry výstřiku nebo vznikne nedostříknutý výrobek. U moderních strojů probíhá dotlak ve více fázích. Nejprve, bezprostředně po stlačení hmoty, se volí dotlak vyšší, aby se forma rychle doplnila nezbytným množstvím hmoty, dokud je tavenina ještě dobře tekutá. Ke konci se dotlak sníží, aby se zmenšila orientace makromolekul, zejména v okolí ústí vtoku. V optimálním případě má dotlak trvat tak dlouho, dokud neztuhne hmota v ústí vtoku. Po skončení této fáze začne probíhat plastikace na další dávku taveniny [2], [5].

#### **2.2.1.4 Chladnutí ve formě**

Chlazení je ovlivněno tvarem a tloušťkou stěn vstřikovaného dílu, teplotou taveniny, vstřikovací rychlostí, průběhem dotlaku, teplotou formy a způsobem chlazení. Dochází zde k podstatným změnám stavových veličin plastu, jako je tlak  $p$ , měrný objem  $v$  a teplota  $T$  v závislosti na čase a z toho důvodu je proces vstřikování řízen podle  $p$ - $v$ - $T$  diagramu (viz Obr. 2.4). Při chladnutí taveniny klesá tlak v dutině formy až na hodnotu zbytkového tlaku, při kterém ideálně dochází k eliminaci propadlin a po něm může následovat otevření formy. Dále má chlazení podstatný vliv na orientaci a vnitřní pnutí výstřiku, a také na kvalitu povrchu a jeho lesk. Současný vývoj řízení vstřikovacího procesu pomocí počítače směřuje k tomu, aby byl počítači zadán  $p$ - $v$ - $T$  diagram příslušného plastu se zakódovaným požadovaným průběhem procesu [2], [5].

#### **2.2.1.5 Vyhození výstřiku z formy**

Výstřik musí být dostatečně tuhý, aby se při vyjmutí z formy nedeformoval. V  $p$ - $v$ - $T$  diagramu mezi body 5 a 6 dochází k chladnutí výrobku ve formě, v bodě 6 se forma otevírá a následuje vyhození výrobku, do bodu 0 chladne výrobek mimo formu až dosáhne teploty okolí.

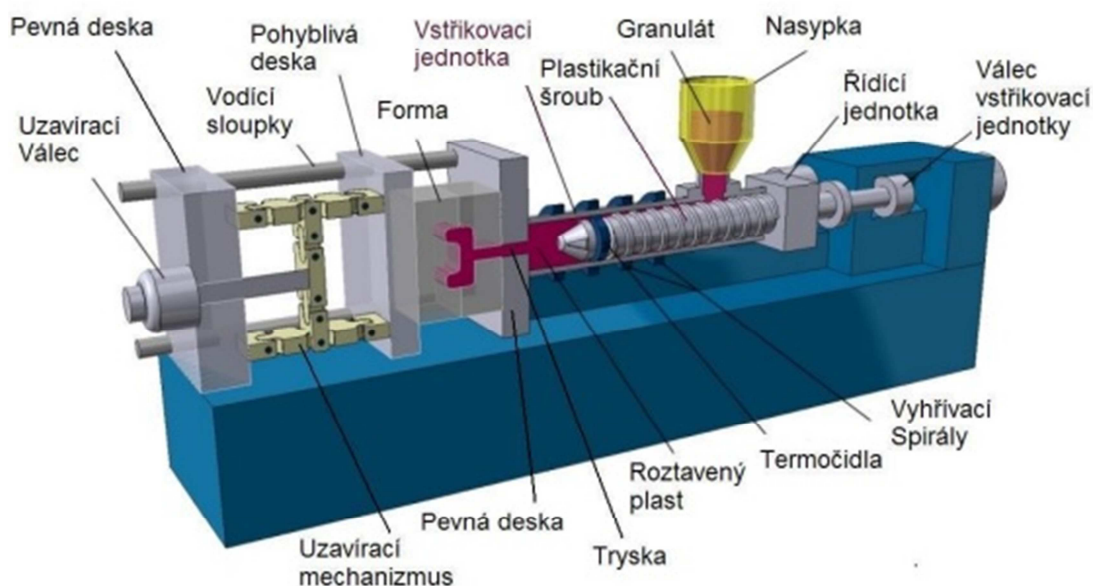


Obr. 2.4 Vstřikovací cyklus v  $p$ - $v$ - $T$  diagramu. Body 0: začátek procesu, 1: hnětení, 2-3: vstřikování, 3-4: izobarický dotlak 4-5: přechod k izochorickému dotlaku, 5-6: chladnutí, 6: forma se otevírá [10]

## 2.2.2 Konstrukční provedení vstřikovacích strojů

Vstřikovací stroje mohou být podle konstrukce buď pístové, nebo dnes převážně používané stroje šnekové. Vstřikovací stroj má dvě na sobě závislé jednotky, a to vstřikovací a uzavírací jednotku a dále pak ovládací elektrické a hydraulické okruhy. Vstřikovací jednotka zajišťuje dávkování granulátu, jeho plastikaci, vstříknutí do formy, provedení dotlaku a zajištění dalších pohybů šneku. Plastový granulát se nasype do násypky stroje. Z té je odebírán otáčejícím se šnekem, který ho stlačuje a dopravuje do vytápěné tavící komory. Šnek během otáčení ustupuje dozadu. Granulát se v této komoře nahřeje na teplotu plastifikace a jako tavenina se hromadí před čelem šneku. Poté je otáčivý pohyb šneku zastaven, šnek se pohybuje dopředu jako píst a vstřikuje taveninu do dutiny formy, která dá výrobku požadovaný tvar. Tavící komora je zakončena tryskou, která spojuje vstřikovací jednotku s formou. Forma je kovová a navíc chlazená kanálky s protékající vodou. Teplota formy se u běžných termoplastů obvykle volí mezi 20 až 50°C, některé konstrukční termoplasty vyžadují pro dosažení optimálního strukturního uspořádání vyšší teplotu formy, v některých případech i nad 100°C. Vstříknutá hmota předává do formy teplo a ochlazením ztuhne. Po zchladnutí výstřiku je forma rozevřena a

díl se z formy vyjme, nebo je vyhozen vyhazovacími kolíky. Poté se forma uzavře a celý cyklus se opakuje [2], [5], [11].



*Obr. 2.5 Schéma vstřikovacího stroje [11]*

Nejběžnějším typem je horizontální vstřikovací stroj s jednou vstřikovací komorou, s upnutou formou s vertikální dělicí rovinou (viz. Obr. 2.5). Hotové výrobky mohou volně padat do prostoru pod strojem, nebo mohou být odebírány z vrchu manipulátorem. Uzavírací jednotka stroje zajišťuje uzavření vstřikovací formy po dobu plnění a následné pohyby formy při vyjímání výstřiků. Musí zajistit uzavření formy takovou silou, aby se při vstříknutí tlakem taveniny neotevřela. Skládá se z opěrné desky, která je pevně spojená s ložem stroje. Z pohyblivé desky, která slouží k upnutí pohyblivé části formy a upínací desky s otvorem pro tryšku stroje, na kterou se upne nepohyblivá část formy. Také sem řadíme uzavírací a přidržovací mechanismus. Uzavírací systémy mohou být konstruovány jako hydraulické, mechanické, nebo jako jejich kombinace [2], [11].

### 2.2.3 Vstřikovací forma

Forma udává vstříknutému plastu požadovaný tvar a chladí jej na takovou teplotu, kdy je výstřik dostatečně tuhý a může být bezpečně vyjmut. Forma musí být velice přesně vyrobena, což je finančně náročné. Dále musí odolávat vysokým

tlakům a tepelnému namáhání, musí také umožnit snadné vyjmutí výstřiku.

Vstřikovací formy lze dělit podle konstrukčního řešení na dvou-deskové, tří-deskové, čelistové, etážové apod. Podle násobnosti na jednonásobné a vícenásobné, podle typu stroje na formy se vstřikováním do dělicí roviny nebo kolmo na ní. Základní části formy jsou tvarová dutina, temperační systém, vtokový systém, vyhazovací systém a vodící a upínací elementy [5].

#### **2.2.3.1 Tvarová dutina**

Je to nejdůležitější část formy, odpovídá tvaru požadovaného výrobku. Musí v ní být zohledněno smrštění. Forma odebírá z výstřiku teplo a proto je žádoucí, aby se hmota ochlazovala ve všech místech stejnou rychlostí. Důležité je také odvzdušnění tvarové dutiny před vstřikováním, aby nedocházelo ke vzniku vad.

#### **2.2.3.2 Temperační systém**

Temperační systém slouží k odvádění tepla ve formě. Jedná se o systém kanálků a dutin, jimiž protéká chladicí médium a umožňuje přestup tepla z taveniny do formy a následně do chladicího média. Forma se ohřívá při vstřikovacím cyklu, a proto je potřeba dobrá temperace, která ovlivňuje plnění tvarové dutiny a zajišťuje optimální tuhnutí a chladnutí plastu. Průřez kanálků je nejčastěji kruhový a pohybuje se od 6 do 20 mm. Průměrem a vzdáleností kanálků od sebe, dutiny formy a od stěn můžeme také regulovat intenzitu odváděného tepla v různých částech formy. Nejintenzivněji by mělo být teplo odváděno od vtoku. Při dobře řešeném temperačním systému má forma dobrou tepelnou stabilitu a malé nebezpečí deformace při vysokých vstřikovacích tlacích [6].

#### **2.2.3.3 Vtokový systém**

Vtokový systém je tvořen vtokovými kanálky, které spojují tvarovou dutinu formy s tavicí komorou. Tvar a způsob umístění vtoku má podstatný vliv na proudění taveniny do formy, orientaci makromolekul, nebo vznik různých vad jako jsou dutiny, staženiny, studené spoje apod. Hlavní zásadou je, aby tavenina plnila formu co nejrychleji, nejkratší možnou cestou a rovnoměrně ve všech částech dutiny. Pro jednonásobné formy se používají živé vtoky, plné vtoky (u tlustostěnných výstřiků, horší oddělení), vtoky bodové (u tenkostěnných výstřiků, snadné oddělení), vtoky tunelové, filmové atd. U vícenásobných forem je nejdůležitější, aby všechny tvarové dutiny byly plněny současně, při stejné teplotě a tlaku. Tloušťka kanálků se určuje podle teploty plastu, tloušťky stěny a velikosti výstřiku. Jejich průřez může být

kruhový nebo hranatý. Nejčastější způsoby rozmístění jsou hvězdicové, řadové nebo kruhové [2], [5], [6].

Oddělením vtoku od výstřiku musí být co nejméně narušen vzhled výstřiku. Výhodou jsou formy s vyhlívanou vtokovou soustavou, kde nezůstává žádný materiál k odstranění. Jsou ale poměrně složité a finančně náročné [12].

#### **2.2.3.4 Vyhazovací systém**

Při ochlazování výstřiku dochází k jeho smršťování a vlivem toho ulpívá na formě. Pro jeho snadné vyjmutí se používají vyhazovače. Nejčastěji používané jsou mechanické vyhazovače v podobě kolíků. Pro výrobky válcového tvaru to jsou stírací kroužky, nebo lišty. Často se také používá k vyhazování stlačený vzduch. Důležité je správné určení vyhazovací síly, aby byla dostatečně velká pro vyhození a aby zbytečně nepoškozovala výstřik. Plochy vyhazovacích prvků a jejich umístění musí být voleno tak, aby nezpůsobovalo deformace dílů. Vyhazovací systém také umožňuje vyhození vtokových zbytků [5], [6].

### **2.3 Bionika**

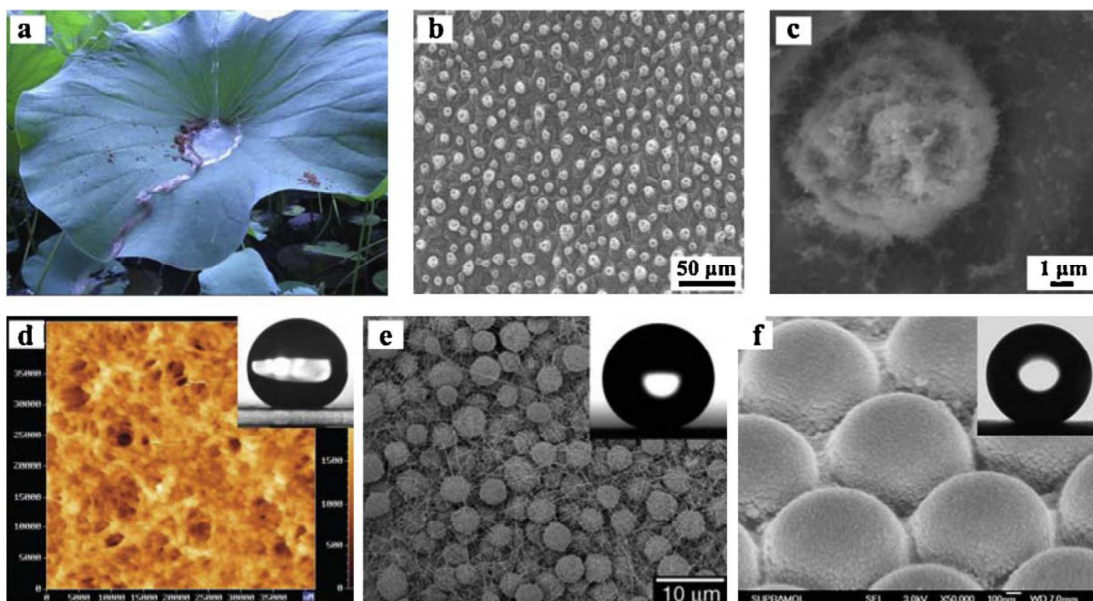
Slovo BIONIKA je odvozeno z kombinace dvou pojmů – biologie a technika. Je to mladá, interdisciplinární oblast výzkumu spojující biologii především s technickými vědními obory, architekturou a matematikou. Cílem bioniky je podrobné studium živých organismů a jejich struktur, které se během několika milionů let vyvinuly v téměř dokonalé systémy a uplatňování těchto poznatků pro vývoj nových technologií [13].

V posledních letech bylo vědci zjištěno, že struktura biologických materiálů poskytuje hned několik víceúčelových vlastností. Právě tento objev je inspirací pro vytvoření víceúčelových syntetických materiálů, které jsou věčným cílem lidstva. Typickými biologickými zástupci těchto víceúčelových funkcí jsou například listy lotosu, křídla motýla, nohy vodoměrky, listy rýže, složené oči hmyzu, šupiny ryb, okvětní lístky růže, pavoučí síť, skleněné mořské houby, nohy gekona a mnoho dalších. Vzhledem k náplni této diplomové práce, kde se zabýváme výrobou a hodnocením povrchových vlastností bionického dezénu, si v následných kapitolách blíže představíme některé typické zástupce a jejich syntetickou přípravu.

### 2.3.1 Listy lotosu a jejich biomimetická tvorba

V přírodě vykazuje mnoho rostlin zvláštní schopnosti smáčení. Mezi nimi je nejznámějším zástupcem lotos, lépe známý jako leknín. Při studiích povrchové struktury listů lotosu bylo zjištěno náhodné rozdělení mikro-papil (5-9 $\mu\text{m}$  v průměru), které pokrývají primární strukturu složenou z výstupků (viz. Obr. 2.6b,c). Díky tomuto složitému reliéfu, navíc ještě umocněnému kutinem, což je ochranný voskovitý povrch, získávají listy nízkou přilnavost a výbornou hydrofobii. Kapičky vody na jejich povrchu jsou téměř kulovitěho tvaru, a pokud je povrch trochu nakloněn, mohou se volně válet ve všech směrech a přitom sbírat špinavé částičky ulpělé na listech, což má za následek tzv. samočistící účinek či lotosový efekt (viz. Obr. 2.6a) [4], [14], [16].

Listy lotosu proto inspirovaly mnoho různých strategií na vývin a konstrukci podobných syntetických povrchů, které by měly superhydrofobní a samočistící vlastnosti.



Obr. 2.6 (a) Volně se odvalující kapičky vody po povrchu. (b) Snímek náhodného rozložení mikro-papil z elektronového mikroskopu (SEM). (c) SEM snímek jedné mikro-papily. (d) Snímek i-PP nátěru s p-xylenem z mikroskopie atomárních sil (AFM), v rohu kapka vody na tomto povrchu. (e) SEM snímek polystyrenového povrchu vytvořeného metodou EHD, v rohu kapka vody na tomto povrchu. (f) SEM snímek bionického povrchu složenému z hemisfér a částic Ag, v rohu kapka vody na tomto povrchu. [14]



K napodobování struktury listu lotosu byla vyvinutá jednoduchá a levná metoda, kdy se připravuje super-hydrofobní nátěr z izotaktického polypropylenu (i-PP) použitím vhodných rozpouštědel a teploty k řízenému růstu drsného povrchu. Výsledný gelový pórovitý nátěr vykazuje velkou hydrofobii s kontaktním úhlem až  $160^\circ$  (viz. Obr. 2.6d). Tyto nátěry mohou být aplikovány na širokou škálu substrátů, jako jsou například podložní sklička, hliníkové fólie, nerezové oceli, teflon, vysoko hustotní polyetylen a polypropylen.

Další možností je elektro-hydrodynamika (EHD) či elektrokinetika, což je všestranná a efektivní metoda na výrobu mikro i nanovláken či částecek. Využitím EHD metody se připravují tenké polystyrénové hydrofobní struktury, skládající se z mikro-výběžků a nano-štetinek (viz. Obr. 2.6e). Pórovité mikro-výběžky zvyšují drsnost povrchu a tím přispívají k velké hydrofobii a nano-štetinky tvoří trojrozměrnou síť, která uceluje a posiluje celý kompozitní povrch.

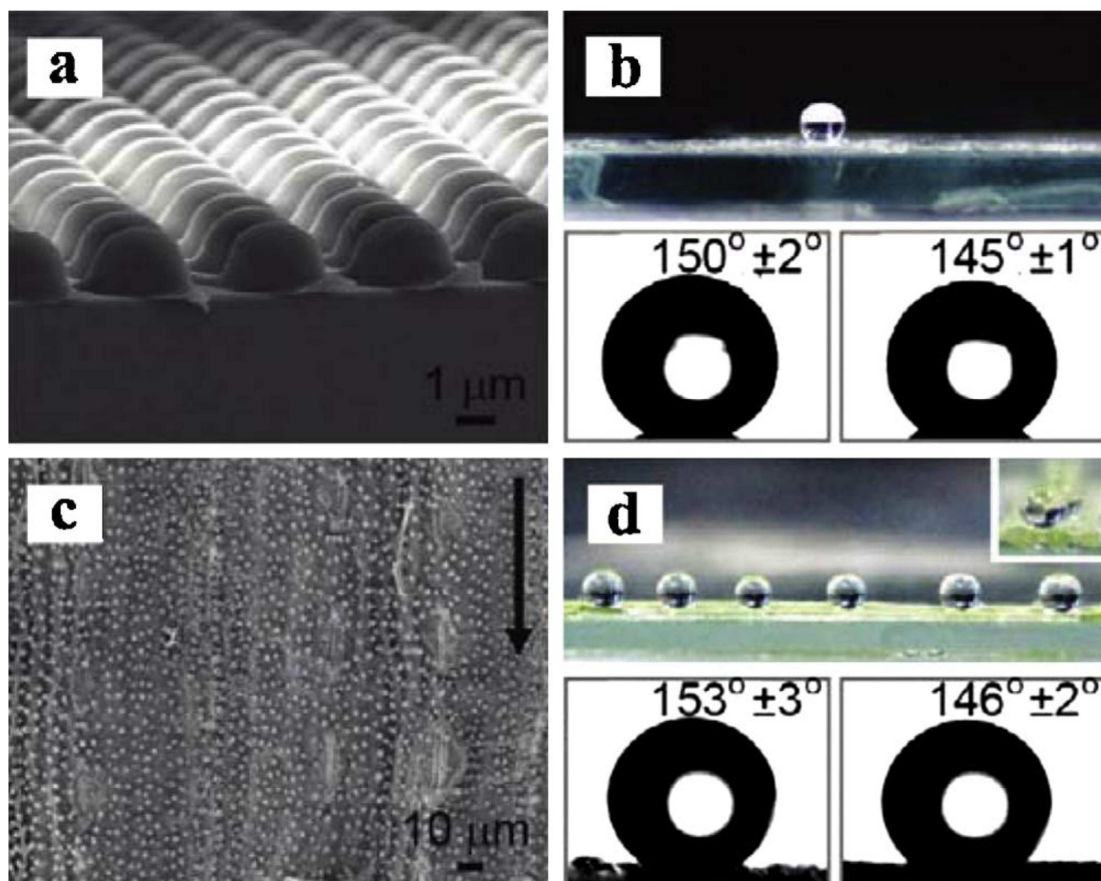
Nedávno byl vytvořen flexibilní super-hydrofobní reliéf inspirovaný listy lotosu, kdy na povrchu pokrytém hemisférami se tepelně odpaří nanočástice stříbra a jsou modifikovány 1-Dodekanthiolem. 1-Dodekanthiol je bezbarvá kapalina, která je ve vodě prakticky nerozpustná a používá se k výrobě hydrofobních vrstev a jako polymerační inhibitor. Morfologie získaného syntetického reliéfu je velice podobná přírodním listům lotosu (viz. Obr. 2.6f). Bionické polymerní tenké povlaky mají dobré flexibilní a pozoruhodné hydrofobní vlastnosti s vysokými kontaktními úhly [14], [15], [16].

### **2.3.2 Rýžové listy a jejich biomimetická tvorba**

Další zajímavý rostlinný list je rýžový list. Na rýžových listech jsou hierarchicky uspořádané papily podobné s těmi na listech lotosu, ale jsou uspořádané v téměř jednosměrném pořadí souběžném s okrajem listu. Tato zvláštní struktura a morfologie poskytuje rýžovému listu jak velkou hydrofobii, tak anizotropní smáčivost, kde se kapičky vody můžou válet snadněji podél směru rovnoběžného s okrajem listu než kolmo k němu [14].

V současnosti se replikace povrchových struktur rýžového listu provádí efektivní metodou dvoufázového mikro-mouldingu. Vytvořené umělé exponáty mají nejen velmi dobrou strukturu přírodního rýžového listu, ale také povrchové

anizotropní smáčení. Výroba umělých listů použitím poly (N-isopropylacrylamidu) vykazuje dobrou termální rozpustnost již při teplotě 32°C, proto by mohla být dobře využita také v tkáňovém inženýrství. K dosažení kontroly nad anizotropním smáčením podél obou směrů, se používá laserová litografie, která vytvoří velké oblasti osázené mikro-perlami (viz. Obr. 2.7). Anizotropní navlhavost u analogických bionických materiálů je tak téměř stejná jako u přírodní rýže [14], [15].



*Obr. 2.7 Porovnání bionického povrchu a přírodního rýžového listu  
(a) SEM snímek průřezu mikro-perel na bionickém povrchu. (b) Snímek kapky vody na vytvořeném povrchu s kontaktními úhly. (c) SEM snímek přírodního rýžového listu. (d) Snímek kapky vody na přírodním povrchu s kontaktními úhly. [14]*

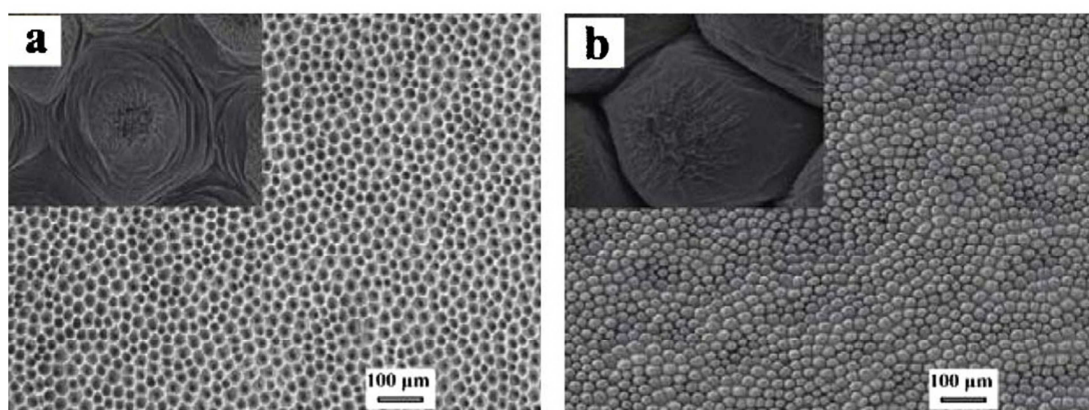
### 2.3.3 Okvětní lístky růže červené a jejich bionická tvorba

Květiny přitahují lidi pro jejich krásný zjev a oslnivé barvy. Růže jsou trvalky, u kterých se vyskytuje více než 100 druhů, disponujících různorodými

barvami. Okvětní lístky růže červené mají multifunkční vlastnosti. Nejen superhydrofobii, ale oproti ní také velkou vodní přilnavost a strukturální barvu. Voda tvoří kulovité kapičky na okvětních lístcích růže, ale tyto kapičky nemohou sklouzávat z povrchu pryč, dokonce, i když růži otočíme horní částí dolů. Povrch okvětních lístků růže disponuje polem mikro-papil a na vrcholu každé mikro-papily je mnoho nano záhybů. Kombinace mikro a nano hierarchických struktur poskytuje okvětním lístkům růže dostatečně drsný povrch pro superhydrofobii a současně vysokou adhezní sílu k udržení kapiček. Okvětní lístky tak posloužily jako příklad pro výrobu bionických polystyrénových (PS) povlaků, které disponují jak superhydrofobií, tak vysokou vodní přilnavostí [4], [16].

Kromě okvětních lístků růže červené existují i okvětní lístky jiných růží, které se vyznačují také superhydrofobií, ale naopak mají nízkou přilnavost vody podobnou listu lotosu. Napodobováním povrchů okvětních lístků byly vytvořené umělé povrchy s vysokou a nízkou adhezí použitím dvoufázového moulding procesu a nanášením vosku vypařovací metodou [14].

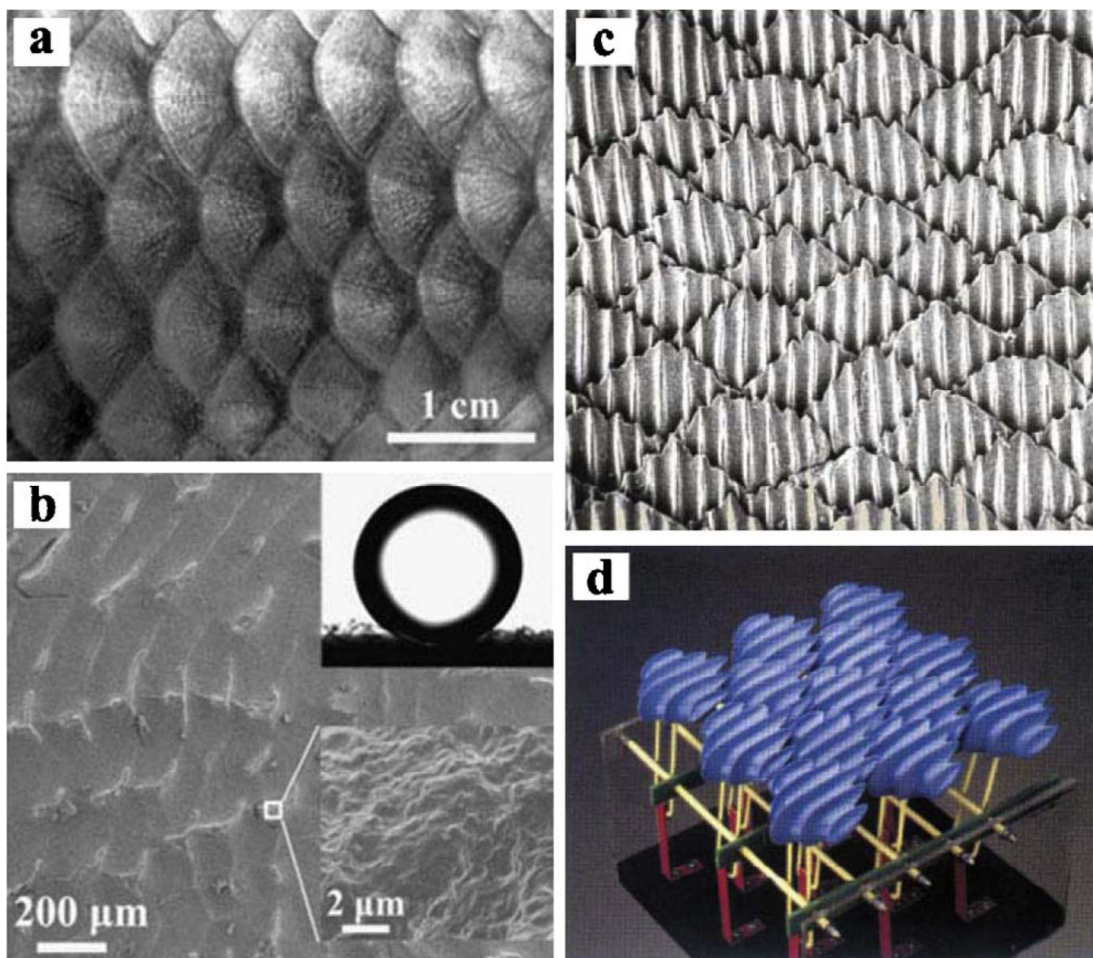
Kombinace strukturální barvy díky nano strukturám a chemické barvy díky pigmentu, poskytuje okvětním lístkům jasný zjev. Biomimetické polyvinylalkohol (PVA) povlaky se zápornou strukturou okvětních lístků a polystyrénové (PS) povlaky s pozitivní strukturou okvětních lístků, byly vytvořené podle šablony přírodních růží (viz. Obr. 2.8). Tyto uměle vytvořené reliéfy mají pouze strukturální barvu, protože do nich nebylo přidáno žádné barvivo. Tento výzkum je užitečný k dalšímu porozumění strukturální barvě v květinách a poskytuje užitečné informace pro design bionických optických zařízení [14], [15], [17].



*Obr. 2.8 SEM snímky biomimetických povrchů. (a) PVA reliéf s obrácenou strukturou okvětních lístků. (b) PS reliéf se strukturou lístku červené růže. Na menších snímcích je detail vždy jedné papily. [14]*

### 2.3.4 Šupiny ryb a jejich bionická tvorba

Živočichové žijící pod vodou, jako například kapr, nebo žralok, můžou plavat volněji kvůli jejich zvláštním povrchovým strukturám. Šupiny kapra jsou pokryté orientovanými mikro papilami (viz. Obr. 2.9a), které nejen snižují tření, ale také poskytují super-oleofilní vlastnosti na vzduchu a super-oleofobní vlastnosti ve vodě. Super-oleofobní rybí povrch pochází z vodní mikro-fáze složené z nano hierarchických struktur [14].



Obr. 2.9(a) Zvětšený detail na přírodní šupiny kapra. (b) SEM snímek polyakrylamidového reliéfu a fotografie olejové kapky na tomto podkladu ve vodě. (c) Žebrovitá struktura žraločích šupin. (d) Uměle vytvořený povrch inspirovaný žraločími šupinami. [14]

Inspirací chováním olejových kapiček na šupinách ryb ve vodě byl vytvořen super-oleofobní povrch na bázi různých kopolymerů z akrylamidu na pevném substrátu se šupinatou strukturou (viz. Obr. 2.9b). Se stoupající drsností povrchu se



kontaktní úhel kapiček oleje zvýšil a adhezní síly se významně snížily.

Veškerá mořská zvířata a rostliny potřebují spolehlivou obranu proti nechtěnému přirůstání vodních organismů, které jim způsobují znečištění povrchu těla. Například žraloci mohou zůstat celý život pod vodou a přitom se na nich neuchytávají rostliny a svijonožci. Mají destičkové šupiny, které se skládají z pravouhlého řazení začleněného v kůži s malými hřbety, které vyčnívají nahoru z povrchu (viz. Obr. 2.9c). Takto hrubý povrch redukuje tření a tudíž odpor proti proudu vody, díky němuž žralok velmi rychle plave. Žebrovaná struktura šupin žraloka poskytla inspiraci pro design víceúčelových nátěrů na snižování smykového tření a zároveň poskytující samočisticí vlastnosti (viz. Obr. 2.9d). V současné době byly vytvořeny povrchové struktury syntetické žraločí kůže, stupňovitě rozvrstvené mikro útvary na bázi polydimetylsiloxan elastomeru. Tato topografie může významně redukovat usazování spor oproti hladkým povrchům. Tato analogie se také používá k vytvoření speciálních povrchů na letadlech, nebo na plaveckém vybavení [14], [16].

### **2.3.5 Jiné typické víceúčelové bio-inspirované materiály**

Gekon je zajímavé zvíře, které si vyvinulo jednu z nejvšestrannějších a nejefektivnějších adhezí známých v přírodě. Noha gekona je na povrchu utvořená z dobře uspořádaných mikroskopických chloupků (setae), které jsou rozčleněny na stovky ještě menších nanoštetinek ukončených rozšířením (spatulae). Kontakt mezi těmito spatulae a pevným povrchem generuje Van der Waalsovy síly, které jsou dostatečné k tomu, aby dovolily gekonovi lézt na vertikální zdi či po střepech. Navíc mají mimo tohoto pozoruhodného jevu také super-hydrofobní a samočisticí schopnosti. Díky inspiraci povrchu nohou gekona byly vytvořeny povrchy pokryté polymerním polem pilířových útvarů.

Mušle slávky jsou schopné se připevnit k prakticky všem typům organických i anorganických povrchů, včetně mokrých povrchů. Inspirováním této adheze byly vytvořeny přilnavé polydopaminové tenké povlaky využitím dopaminové samopolymerace na širokou škálu organických a anorganických materiálů.

Spojená inspirace gekona a slávek dala za vznik reverzibilní mokré/suché přilnavé polymerní vrstvě složené z imitací polymerních nanopilířů gekona a polydopaminový povlak imitující slávky. Výsledný systém udržuje svoji adhezivní

vlastnost pro více než tisíc kontaktních cyklů jak v suchém, tak i mokřém prostředí [13], [14], [15].

### **2.3.6 Metody výroby nano, mikro a hierarchické struktury**

Následující text zmiňuje některé způsoby vytváření syntetických povrchů, které se inspiřují přírodními strukturami, stejně jako je tomu v našem případě. Například při výrobě superhydrofobního povrchu je potřeba splnit dvě základní podmínky. Povrch musí být dostatečně drsný, aby jeho geometrie zajistila stabilitu rozhraní, a jeho materiál musí být hydrofobní. Druhou podmínku lze splnit nanesením hydrofobního povlaku na používaný substrát, jak bylo zmíněno v předchozích kapitolách.

Drsnost povrchu lze dosáhnout pomocí dvou hlavních způsobů. První způsob je odebírání objemu základního materiálu na povrchu (top-down technika) pomocí různých druhů energie. Mezi základní metody patří fotolitografie, leptání, elektrojiskrové obrábění a tvorba napodobenin pomocí šablon. Druhým způsobem je nanášení výstupků na povrch substrátu (bottom-up technika) pomocí řízeného růstu částic při různých chemických reakcích, nebo pomocí samosestavného efektu. Do této skupiny technik patří fázová separace vícesložkových směsí, samosestavný efekt koloidních částic, sol-gel proces a chemická depozice z plynné fáze (CVD) [15], [18].

## **2.4 Hydrofilita a hydrofobicita**

Jelikož se v experimentální části této diplomové práce budeme zabývat hodnocením povrchových vlastností bionických dezénů metodou smáčení, je vhodné si v následujících kapitolách představit některé důležité pojmy týkající se této problematiky.

Míru hydrofobicity jednotlivých povrchů je možné porovnávat pomocí kontaktního úhlu  $\theta$ , který je vymezen třemi koexistujícími fázovými rozhraními. Je-li měřící kapalinou voda, mluvíme o površích hydrofilních a hydrofobních.

Poměr mezi soudržností molekul vody mezi sebou (kohezí) a jejich přilnavostí vůči pevným povrchům (adhezí) hraje významnou roli v oblasti smáčení. Je-li soudržnost molekul vody (koheze) větší než přilnavost (adheze) k určitému povrchu, jedná se o povrch nesmáčivý - hydrofobní. V opačném případě,

kdy je adheze větší než koheze, je povrch smáčivý - hydrofilní [19].

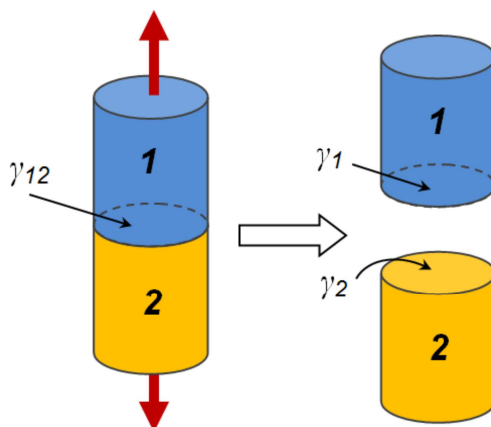
### 2.4.1 Adheze

Adheze je charakterizována jako přilnavost mezi dvěma látkami. Je zprostředkována energií, která se uvolní při styku dvou povrchů, a zaniknou tak energeticky náročná mezifázová rozhraní.

Představme si sloupec o jednotkovém průřezu, složený ze dvou fází kapalina/kapalina a kapalina/pevná látka. Adhezní práce  $W_a$  je práce, která je potřebná k přerušení fází 1 a 2 (viz. Obr. 2.10). Přerušením vznikly dva nové povrchy, o povrchových napětích  $\gamma_1$  a  $\gamma_2$  a došlo k roztržení mezifázového rozhraní, čímž zanikla mezifázová energie  $\gamma_{12}$  [20], [21].

Tento vztah mezi adhezní prací a jednotlivými mezifázovými energiemi popisuje Dupréova rovnice:

$$W_a = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12} \quad (1)$$



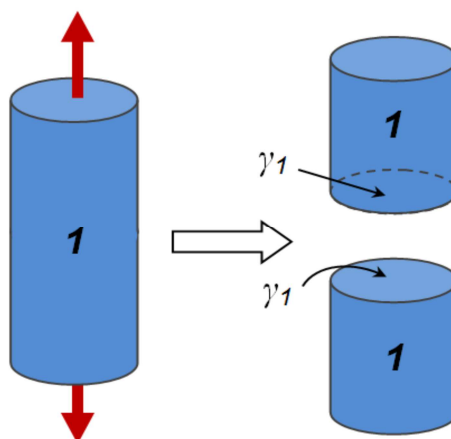
Obr. 2.10 Příklad adhezní práce [18]

### 2.4.2 Koheze

Kohezní síly jsou přitažlivé síly mezi molekulami dané látky. Při představě sloupce tuhé látky (nebo kapaliny) o jednotkovém průřezu je kohezní práce  $W_k$  taková práce, která je potřebná k roztrhnutí sloupce, tj. k vytvoření dvou nových rovnovážných rozhraní s okolím (viz. Obr. 2.11) [20], [21].

To lze zapsat jako:

$$W_k = 2 \cdot \gamma_1 \quad (2)$$



Obr. 2.11 Příklad kohezní práce [18]

## 2.5 Smáčivost

Smáčivost můžeme charakterizovat jako vlastnost kapaliny přilnout k povrchu některých pevných látek. Stupeň smáčení je určen projevem adhezních a kohezních sil, což jsou přitažlivé a odpuzivé síly mezi částicemi povrchových vrstev dvou stýkajících se látek. Smáčivost pevných povrchů se studuje pomocí měření statických, nebo dynamických kontaktních úhlů na aparatuře umožňující toto zobrazení a měření na rozhraní fází [19], [22].

### 2.5.1 Kontaktní úhel smáčení

Měření kontaktního úhlu smáčení je v průmyslu velmi využívaná metoda pro svoji finanční nenáročnost, poměrně velkou rychlost a jistou přesnost a citlivost. Kontaktní úhel smáčení je jednou z mála přímo měřitelných vlastností fázového rozhraní pevná látka/kapalina/plyn. Je to úhel, který svírá tečna k povrchu kapky, vedená v bodě styku kapky s rozhráním. Tato metoda je citlivá na chemickou stavbu svrchní vrstvy molekul a je relativně jednoduchou, levnou a rozšířenou technikou pro charakteristiku polymerních povrchů, jako nástroj k výpočtu povrchové energie polymerů.

Úhel smáčení (tvar kapky) závisí na mezi-povrchových energiích tří koexistujících fázových rozhraní, kde na rozhraní pevná látka/kapalina působí mezifázové napětí  $\gamma_{sl}$ , na rozhraní kapalina/plyn povrchové napětí  $\gamma_{lg}$  a na rozhraní pevná látka/plyn povrchové napětí  $\gamma_{sg}$  [16], [20].



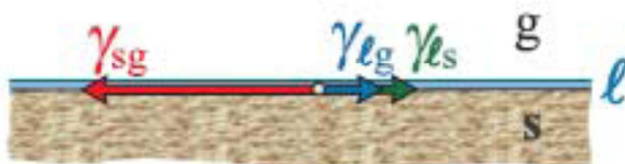
### 2.5.1.1 Fáze, fázová rozhraní

Fáze je část termodynamické soustavy, která je fyzikálně i chemicky homogenní a od ostatních částí soustavy je oddělena ostrým fázovým rozhraním za předpokladu, že nepůsobí vnější síly. Vlastnosti jsou zde konstantní, nebo se spojitě mění v prostoru. Z makroskopického hlediska fázovým rozhraním rozumíme oblast, ve které se jedna nebo více vlastností systému mění skokem. Z mikroskopického, molekulárního hlediska mají fázová rozhraní určitou tloušťku a tedy i určitý objem. Fázová rozhraní kapalina/plyn a pevná látka/plyn bývají označována jako povrchy. Makroskopické vlastnosti a chování látek (např. výparné teplo, neideální chování a kondenzace plynů) i jevy na fázových rozhraních (mezifázové napětí, smáčení a rozestírání, adheze a koheze atd.) jsou ovlivňovány silami, které mají původ v meziatomárních nebo mezimolekulárních interakcích viz kapitoly výše [20].

### 2.5.2 Kapka kapaliny na povrchu pevné látky

Umístíme-li kapku kapaliny na povrch pevné látky, mohou nastat dva případy:

1. Je-li povrchová energie pevné látky větší než součet povrchové energie kapaliny a mezifázové energie pevná látka/kapalina,  $\gamma_{sg} > \gamma_{sl} + \gamma_{lg}$ , kapalina se po povrchu pevné látky rozestře do souvislé vrstvy (viz Obr. 2.12).



Obr. 2.12 Rozestírání

Fázové rozhraní pevná látka/plyn je tak nahrazeno dvěma rozhraními, pevná látka/kapalina a kapalina/plyn, každé z nich o stejné ploše jako původní rozhraní a výsledná energie systému je nižší.

Mezním případem je situace, kdy  $\theta = 0^\circ$ ,  $\gamma_{sg} = \gamma_{sl} + \gamma_{lg}$  a nazývá se **dokonalé smáčení**.

2. Jestliže naopak platí  $\gamma_{sg} < \gamma_{sl} + \gamma_{lg}$  k rozestírání nedojde a kapka kapaliny zaujme na povrchu pevné látky rovnovážný tvar, charakterizovaný tzv. kontaktním úhlem smáčení. To je úhel, který svírá tečna k povrchu kapky kapaliny s rozhraním pevná látka/kapalina v bodě linie smáčení. Linie smáčení je křivka, kde se stýkají všechna tři rozhraní.

Rovnováhu napětí lze zapsat vektorovým součtem jednotlivých rozhraní, což vyjadřuje tzv. **Youngova rovnice**:

$$\gamma_{sg} = \gamma_{sl} + \gamma_{lg} \cdot \cos\theta \quad (3)$$

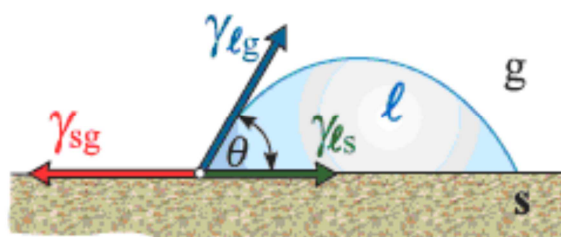
pro úhel smáčení dostáváme:

$$\cos\theta = \frac{\gamma_{sg} - \gamma_{sl}}{\gamma_{lg}} \quad (4)$$

Podle velikosti kontaktního smáčecího úhlu jsou rozlišovány kapaliny, které tuhý povrch:

### 1) SMÁČEJÍ

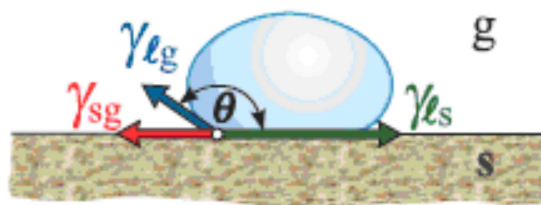
To znamená, že vytvářejí ostrý úhel smáčení,  $0^\circ < \theta < 90^\circ$ . V tomto případě je  $\gamma_{sg} > \gamma_{sl}$  (viz. Obr. 2.13). Pokud se kontaktní úhel nachází pod hodnotou  $10^\circ$  hovoříme o superhydrofilním povrchu.



Obr. 2.13 Dobré smáčení

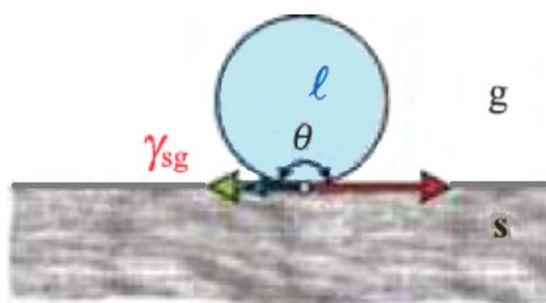
### 2) NESMÁČEJÍ

To znamená, že vytvářejí tupý úhel smáčení,  $90^\circ < \theta < 180^\circ$ . V tomto případě je  $\gamma_{sg} < \gamma_{sl}$  (viz. Obr. 2.14). Pokud je kontaktní úhel nad  $150^\circ$  nazýváme tento povrch superhydrofobním.



Obr. 2.14 Špatné smáčení (nesmáčení)

Mezním případem je situace, kdy kontaktní úhel  $\theta = 180^\circ$ , takový to případ se nazývá dokonalé nesmáčení (viz. Obr. 2.15).



Obr. 2.15 Dokonalé nesmáčení

Youngova rovnice platí pouze, je-li kapka umístěna na ideálně hladkém a homogenním povrchu. V reálu nejsou povrchy dokonale rovné, jsou nehomogenní. Kapka se na nich chová jinak, než na površích ideálních, proto by měl být při vyhodnocování kontaktního úhlu zohledněn i faktor drsnosti povrchu. Toto chování popisují dva základní stavy Wenzelův stav a Cassiův stav, nebo také teorie [16], [20], [23].

### 2.5.3 Wenzelův stav (teorie)

Podle Wenzelovy teorie kapalina proniká mezi nerovnosti na povrchu, zcela je vyplňuje a smáčí tak celý povrch (viz. Obr. 2.16). Kontakt kapaliny s povrchem při této situaci popisuje rovnicí:

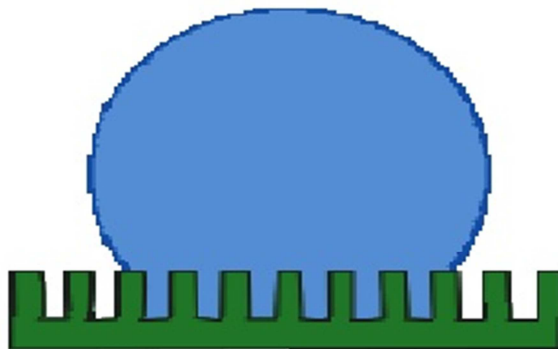
$$\gamma_{lg} \cos \theta_w = r \cdot (\gamma_{sg} - \gamma_{sl}) \quad (5)$$

Kombinací s Youngeho rovnicí dostaneme:

$$\cos \theta_w = r \cdot \cos \theta \quad (6)$$

Kde  $\theta_w$  je kontaktní úhel podle Wenzela a  $r$  je drsnost povrchu.

Tato rovnice ukazuje, že u hydrofobních látek se kontaktní úhel s rostoucí drsností zvětšuje a u hydrofilních látek naopak zmenšuje [24], [25].



*Obr. 2.16 Chování kapky podle Wenzelovy teorie*

#### 2.5.4 Cassiův stav (teorie)

Podle Cassieovy teorie (také Cassie-Baxterova teorie) jsou pod kapalinou v prohlubních vzduchové kapsy, kapka tak sedí střídavě na výběžcích povrchu a na vzduchových kapsách, které dávají vzniknout kompozitnímu povrchu (viz. Obr. 2.17).

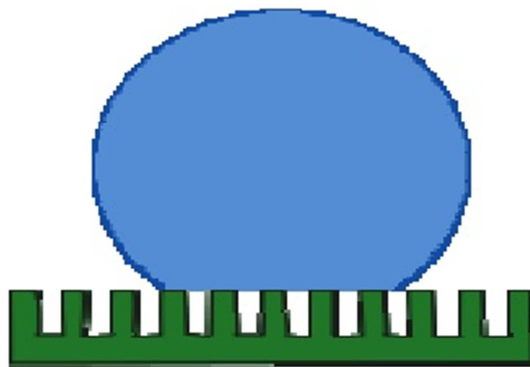
Kontaktní úhel u Cassieho modelu definuje rovnice:

$$\cos \theta_c = f_s \cos \theta_s + f_g \cos \theta_g \quad (7)$$

Kde  $\theta_c$  je kontaktní úhel podle Cassia a  $f_s$  a  $f_g$  značí zastoupení pevné a plynné frakce na povrchu. Kontaktní úhel mezi kapalinou a vzduchem je  $180^\circ$  ( $\cos 180^\circ = -1$ ), proto lze rovnici upravit na tvar:

$$\cos \theta_c = f_s \cos \theta_s + f_s - 1 \quad (8)$$

Rovnice ukazují, že kontaktní úhel na hydrofobním povrchu zdrsněním vzroste, ale na rozdíl od Wenzelovy teorie, na hydrofilním povrchu zdrsněním kontaktní úhel také poroste. Kontaktní úhel roste v obou případech díky hydrofobnímu plynu v prohlubních povrchu [24], [25].



*Obr. 2.17 Chování kapky podle Cassieovy teorie*

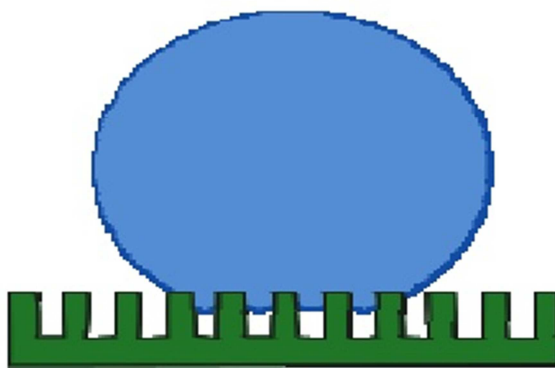
### 2.5.5 Přejchod mezi Cassieho a Wenzelovým stavem

Je to stav, kdy kapalina částečně proniká mezi výběžky na povrchu, ale nesmáčí je celé (viz. Obr. 2.18). Platí pro něj rovnice:

$$\cos \theta_T = (f_s - 1)(r - f_s) \quad (9)$$

Kde  $\theta_T$  nabývá hodnot mezi  $\theta_w$  a  $\theta_c$ .

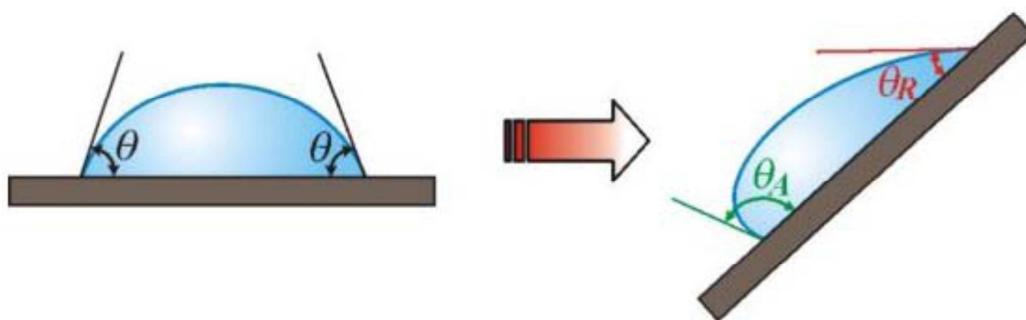
Rovnice je vhodná pro vícestupňovou drsnost, tudíž pro bionické super-hydrofobní hierarchicky strukturní povrchy. Když se mění vlastnosti povrchu z Cassieho modelu na Wenzelův, kapalina zaplňuje prohlubně a to vede ke snižování kontaktního úhlu a rovnice tak přechází do rovnice Wenzelovy [24], [25].



*Obr. 2.18 Přejchod mezi Cassieho a Wenzelovým stavem, kdy postupně dochází k zaplňování prohlubní kapalinou.*

## 2.5.6 Hystereze kontaktního úhlu

Hysterezi se rozumí rozdíl úhlů smáčení kapaliny při jejím pohybu na pevném povrchu. Zmiňované rovnice Wenzelova a Cassie-Baxterova jsou vhodné k určování stálých kontaktních úhlů. Tento jev se dá nejlépe pozorovat na kapce na nakloněné rovině (viz. Obr. 2.19). Kapka ve své spodní nakloněné části postupuje dolů a horní část kapky ustupuje. Postupující úhel se značí  $\theta_A$  (z anglického advancing) a je větší než úhel ustupující  $\theta_R$  (z anglického receding). Při náklonu se tyto úhly budou zvětšovat do okamžiku, než se kapka odvalí. Při valení kapky budou  $\theta_A$  a  $\theta_R$  konstantní, dokud nedojde ke změně podmínek (změna úhlu naklonění).



Obr. 2.19 Hystereze kontaktního úhlu

Nosonovsky a Bhushan odvodili vztah pro hysterezi kontaktního úhlu:

$$H = \theta_A - \theta_R = (1 - f_{LA}) \cdot r \cdot \frac{\cos \theta_{A0} - \cos \theta_{R0}}{-\sin \theta} \quad (10)$$

Kde  $\theta_{A0}$  a  $\theta_{R0}$  jsou postupující a sestupující úhly na ideálně hladkém homogenním povrchu. Ze vztahu lze vidět, že hystereze roste s drsností  $r$  a klesá s rostoucím podílem frakce kapalina/vzduch. To je také důvod, proč mají povrchy s vysokým kontaktním úhlem nízkou hysterezi kontaktního úhlu.

Rozptyl hodnot se pohybuje od  $5^\circ$  až do  $50^\circ$ . Hystereze je obecně přisuzovaná drsnosti, různorodosti povrchu a přítomnosti nečistot. Povrchy s hysterezi kontaktního úhlu menší než  $10^\circ$  mají samočisticí efekt, což je v přírodě právě příklad lotosu indického [23], [24].

### **3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST**

Experimentální část se zabývá popisem výroby zkušebních těles s bionickým reliéfem a zkoušením jejich hydrofilních, či hydrofobních vlastností. Jako materiál pro zkušební tělesa byly vybrány tři různé polymery s rozdílnou polaritou a měření kontaktních úhlů bylo prováděno pomocí metody sedící kapky.

#### **3.1 Výběr jednotlivých druhů polymerů**

Jak je uvedeno výše, pro zkoušení vlastností bionických dezénů byly vybrány tři rozdílné polymerní materiály s ohledem na jejich polaritu. Prvním je polypropylen, zástupce nepolárních plastů. Byl použit granulát PP MOSTEN MA 350. Druhý polymer spadá do kategorie středně navlhavých a jedná se o akrylonitril-butadien-styrén. Granulát ABS NOVODUR 4105. Třetí polymer je polyamid, typický zástupce navlhavých plastů. Granulát PA6 GRODNAMID. Podrobnějšímu seznámení s těmito materiály se věnují následující kapitoly.

##### **3.1.1 Základní charakteristika PP MOSTEN MA 350**

Obecně je polypropylen semikrystalický plast. Je středně pevný, tuhý a houževnatý. Má poměrně vysoký stupeň krystalinity (60-75%), proto je mléčně zakalený. Je lehčí než voda. Teplota použití je do 130°C. Je hořlavý a odkapává. Špatně odolává povětrnosti, pod bodem mrazu křehne, ale je nenavlhavý a má dobrou chemickou odolnost. Dobře se barví, nedá se lepit. Dá se modifikovat velkou řadou přísad. Dobře se vstříkuje, má velkou tekutost [1], [6].

V našem případě pochází dodaný granulát od firmy Unipetrol RPA. Polypropylen Mosten MA 350 je vysokotekoucí homopolymer s úzkou distribucí molekulových hmotností a obsahem antistatického činidla. Vyznačuje se dobrou zpracovatelností a výrobky s vysokým leskem. Typ je vhodný především pro vstřikování do komplikovaných násobných forem a pro výrobu tenkostěnných výrobků. Typickou aplikací je výroba obalů pro potravinářský průmysl, obaly kazet, DVD disků, apod. Typické hodnoty jednotlivých vlastností (viz. Obr. 3.1).

## Product Information

### Mosten MA 350

#### Characteristic

**Polypropylene Mosten MA 350** is a high melt flow rate homopolymer with narrow molecular weight distribution, intended for injection moulding. It contains antistatic stabilization. It offers good processability and high gloss of final products. It is especially suitable for thin walled injection moulded products and for injection moulding into multiple moulds. Typical application is production of various foodstuffs packaging, VHS and DVD boxes, etc.

#### Typical properties and usage

Property	Unit	Typical value	Testing method
MELT FLOW RATE (230/2,16)	g/10 min	50.0	ISO 1133
YIELD STRESS	MPa	34	ISO 527
ELONGATION AT BREAK	%	>100	ISO 527
FLEXURAL MODULUS	MPa	1500	ISO 178
YIELD STRESS	MPa	34	ISO 527
CHARPY NOTCHED IMPACT STRENGTH 23°C	kJ/m <sup>2</sup>	2.0	ISO 179
CHARPY NOTCHED IMPACT STRENGTH -20°C	kJ/m <sup>2</sup>	-	ISO 179
VICAT SOFTENING TEMPERATURE	°C	154	ISO 306
HDT (1,8 MPa)	°C	55.000	ISO 75

#### Notice:

Data from table are represent typical values of each property. It is informative data, i.e. doesn't extent of specification of this type.

**Mosten MA 350** meets the hygienic regulations concerning contact with food of European Union (Commission Directives), Germany (BfR) and USA (FDA). The product is not classified as hazardous preparation according to Directive 1999/45/EC.

*Obr. 3.1 Materiálový list polypropylenu Mosten MA 350 [26]*

### 3.1.2 Základní charakteristika ABS NOVODUR 4105

Terpolymer ABS (Akrylonitril-butadien-styren) je tříložková směs základních monomerů, u kterých se vhodnou kombinací podařilo zlepšit chemickou odolnost plastu (vlivem akrylonitrilové složky) a podstatně zvýšit houževnatost (vlivem butadienové složky), a to při zachování dostatečné pevnosti a tuhosti materiálu. Je to amorfni plast, tuhý, tvrdý, má lesklý povrch. Je těžší než voda, bez přísad čirý. Teplota použití je do 70°C. Je hořlavý, pod vlivem UV záření křehne. Mírně navlhavý, dá se dobře barvit, lepit a potiskovat [1], [6].

Granulát ABS NOVODUR 4105 byl dodán výrobcem Styrolution. Podle stránek výrobce se tento kopolymer vyznačuje vhodnými vlastnostmi ke vstřikování, dobrou rázovou houževnatostí a rozměrovou stabilitou. Je snadno zpracovatelný a



výrobky mají vysokou kvalitu povrchu. Více informací nabízí materiálový list (viz. Obr. 3.2).

Novodur® Ultra 4105   (ABS+PC)   Styrolution Group GmbH			
Product Texts			
Medium high heat grade with superior impact resistance, PC-modified, low emission			
ISO Shortname: ISO 2580-1 -ABS 2-X, MG, 105-04-35-20			
<a href="#">top</a>			
Rheological properties	Value	Unit	Test Standard
<a href="#">Melt volume-flow rate, MVR</a>	14	cm³/10 min	ISO 1133
<a href="#">Temperature</a>	260	°C	ISO 1133
<a href="#">Load</a>	5	kg	ISO 1133
<a href="#">top</a>			
Mechanical properties	Value	Unit	Test Standard
<a href="#">Tensile Modulus</a>	2000	MPa	ISO 527-1/-2
<a href="#">Yield stress</a>	45	MPa	ISO 527-1/-2
<a href="#">Yield strain</a>	3.7	%	ISO 527-1/-2
<a href="#">Nominal strain at break</a>	15	%	ISO 527-1/-2
<a href="#">Charpy notched impact strength, +23°C</a>	40	kJ/m²	ISO 179/1eA
<a href="#">Charpy notched impact strength, -30°C</a>	30	kJ/m²	ISO 179/1eA
<a href="#">top</a>			
Thermal properties	Value	Unit	Test Standard
<a href="#">Temp. of deflection under load, 1.80 MPa</a>	99	°C	ISO 75-1/-2
<a href="#">Temp. of deflection under load, 0.45 MPa</a>	108	°C	ISO 75-1/-2
<a href="#">Vicat softening temperature, 50°C/h 50 N</a>	106	°C	ISO 306
<a href="#">Coeff. of linear therm. expansion, parallel</a>	0.9	E-6/K	ISO 11359-1/-2
<a href="#">Coeff. of linear therm. expansion, normal</a>	0.9	E-6/K	ISO 11359-1/-2
<a href="#">Burning Behav. at 1.5 mm nom. thickn.</a>	HB	class	IEC 60695-11-10
<a href="#">Thickness tested</a>	1.6	mm	IEC 60695-11-10
<a href="#">top</a>			
Electrical properties	Value	Unit	Test Standard
<a href="#">Relative permittivity, 100Hz</a>	3	-	IEC 60250
<a href="#">Relative permittivity, 1MHz</a>	3	-	IEC 60250
<a href="#">Dissipation factor, 100Hz</a>	38	E-4	IEC 60250
<a href="#">Dissipation factor, 1MHz</a>	86	E-4	IEC 60250
<a href="#">Volume resistivity</a>	>1E13	Ohm*m	IEC 60093
<a href="#">Surface resistivity</a>	>1E15	Ohm	IEC 60093
<a href="#">top</a>			
Other properties	Value	Unit	Test Standard
<a href="#">Density</a>	1070	kg/m³	ISO 1183
<a href="#">top</a>			

Obr. 3.2 Materiálový list ABS NOVODUR 4105 [27]

### 3.1.3 Základní charakteristika PA6 GRODNAMID

Obecně jsou polyamidy lineární polymery, semikrystalické se stupněm krystalinity až 60%. Mají nažloutlou barvu, mléčné zakalení a jsou tuhé. Rozeznáváme několik druhů (PA6, PA66, PA11, PA12). Čísla za označením polyamid charakterizují výchozí polymery podle počtu atomů uhlíku v jejich molekulách. V našem případě máme PA6, je to houževnatý termoplast, který má krystalický podíl cca 45%. Trvalá teplotní odolnost je do 80°C. Obtížně hoří a po

vyjmutí z plamene zhasíná. Vyznačuje se vysokou navlhavostí, je vláknotvorný a má dobrou tažnost a odolnost proti otěru. Barvitelnost je dobrá [1], [6].

Granulát PA6 GRODNAMID byl dodán výrobcem GRODNO Khimvolokno. Je modifikovaný přísady, které zvyšují jeho zpracovatelské vlastnosti. Vhodný ke vstřikování dílů například v automobilovém průmyslu a strojírenství. Více informací je v materiálovém listu (viz Obr. 3.3).

#### Material Data Sheet



#### **GRODNAMID PA6-L-211/311**

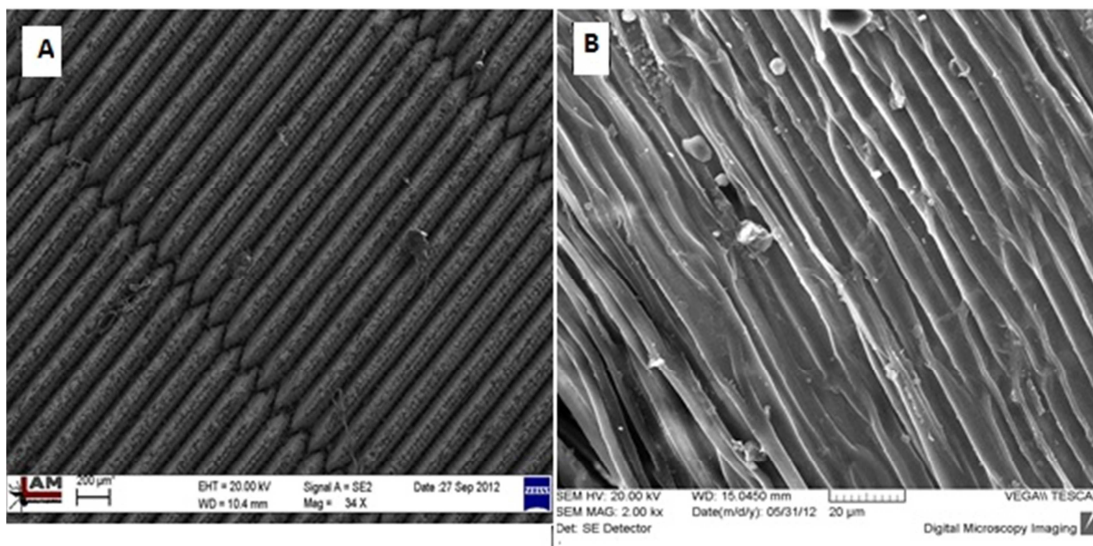
	Test method	Unit	Value
<b>RHEOLOGICAL PROPERTIES</b>			
<b>Melt Flow Rate</b> (230°C, 2.16 kg load)	ISO 1133	g/10 min	9 – 16
(270°C, 2.16 kg load)			40 – 55
<b>Molding shrinkage</b> (60×60×2 mm)	ISO 294-4	%	1.2 – 2.0
<b>MECHANICAL PROPERTIES</b>			
<b>Tensile strength</b> (20 mm/min)	ISO 527	MPa	70
<b>Elongation at break</b> (20 mm/min)	ISO 527	%	70
<b>Tensile modulus</b> (1 mm/min)	ISO 527	MPa	2500
<b>Flexural stress</b> (2 mm/min)*	ISO 178	MPa	77
<b>Flexural modulus</b> (2 mm/min)	ISO 178	MPa	2300
<b>Charpy impact strength</b> (+23°C)	ISO 179/1eU	kJ/m <sup>2</sup>	n. b.
<b>Charpy impact strength</b> (–30°C)	ISO 179/1eU	kJ/m <sup>2</sup>	75
<b>Charpy notched impact strength</b> (+23°C)	ISO 179/1eA	kJ/m <sup>2</sup>	8
<b>Charpy notched impact strength</b> (–30°C)	ISO 179/1eA	kJ/m <sup>2</sup>	5
<b>THERMAL PROPERTIES</b>			
<b>Melting point</b> (10 °C/min)	ISO 3146	°C	217
<b>Temp. of deflection under load</b> 0.45 MPa	ISO 75-1/-2	°C	130 – 140
1.80 MPa			45 – 55
<b>Vicat softening point</b> (50 °C/h)	ISO 306	°C	–
<b>ELECTRICAL PROPERTIES</b>			
<b>Volume resistivity</b>	IEC 60093	Ohm×m	10 <sup>13</sup>
<b>Surface resistivity</b>	IEC 60093	Ohm	10 <sup>13</sup>
<b>Comparative tracking index</b>	IEC 60112		–
<b>OTHER PROPERTIES</b>			
<b>Water absorption, %</b> 24h/23°C	Sim. to ISO 62	%	2.2
30 min at boiling			2.5
<b>Moisture absorption from air</b>	Sim. to ISO 62	%	2.5
<b>Density</b>	ISO 1183	g/cm <sup>3</sup>	1.13

\* – deflection equal to 1.5 times the thickness of the test specimen  
n. b. – no break

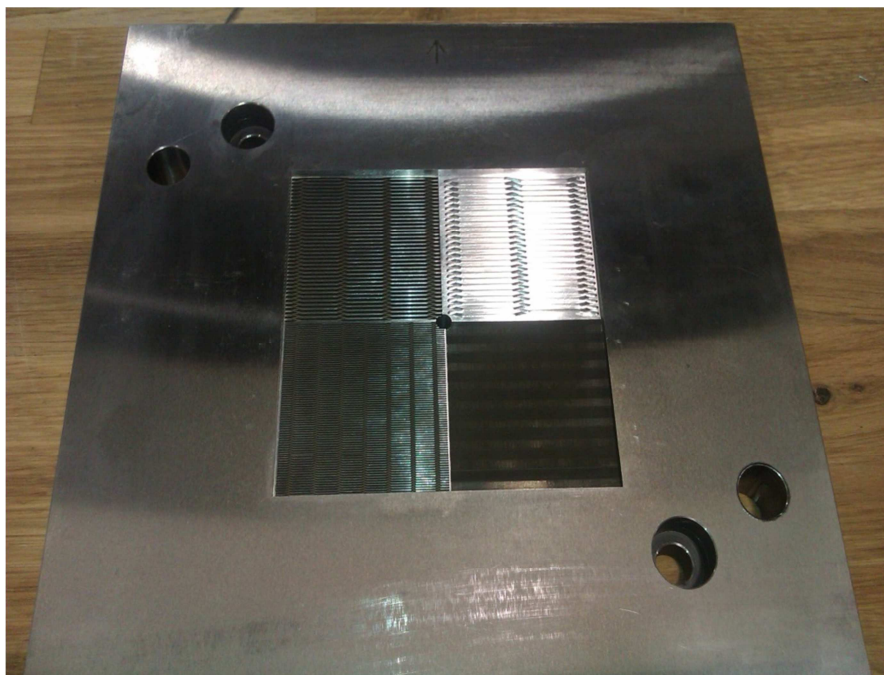
Obr. 3.3 Materiálový list PA6 GRODNAMID [28]

### 3.2 Vstřikovací forma

Pro zkušební vzorky na hodnocení povrchových vlastností bionických dezénů byla navrhnutá jednonásobná vstřikovací forma, která umožňuje výrobu destiček se čtyřmi rozdílnými oblastmi (viz. Obr. 3.5). Tyto oblasti představují bionickou strukturu, která se inspiroje detailním mikropovrchem přírodního mechu. Na výrobu reliéfu formy byla použita nejmodernější dostupná technologie. Vytvořily se tak sice struktury, které jsou velmi podobné struktuře přírodního mechu, ale i ten nejmenší možný vyrobitelný povrch je 40x zvětšený oproti reálné struktuře. Detailní pohled na vytvořený reliéf ve formě s porovnáním biologické předlohy je na obrázku 3.4. V současné době neexistuje taková technologie, která by byla schopna vyrobiť ve stejném měřítku tak jemnou strukturu, jakou má přírodní mech.

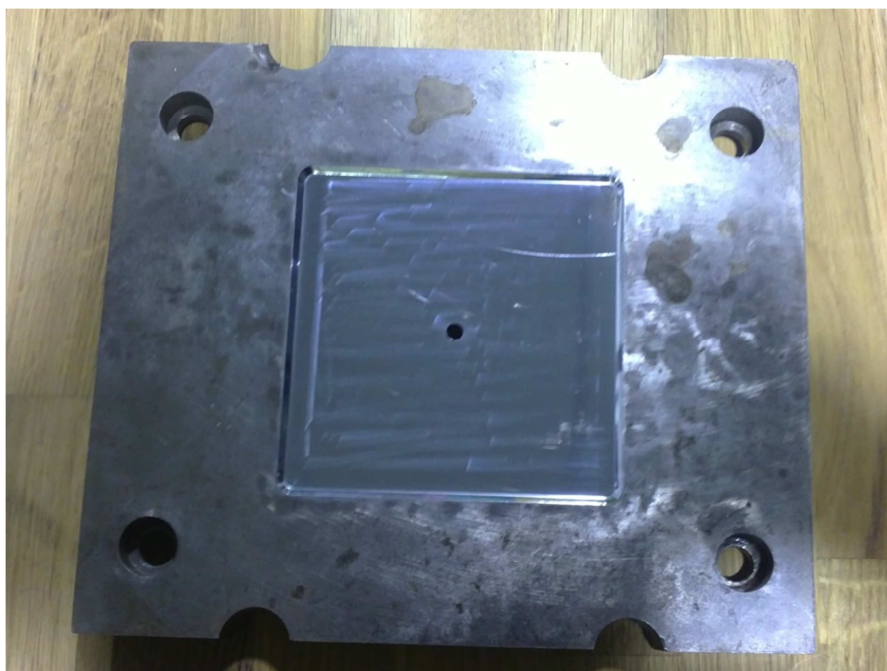


*Obr. 3.4 (A) SEM snímek biomimetického povrchu vstřikovací formy. (B) SEM snímek povrchu přírodního mechu.*



*Obr. 3.5 Výměnná vložka vstřikovací formy se 4 druhy bionického dezénu*

Abychom mohli porovnávat hodnoty naměřené na bionickém dezénu s hodnotami na normálním hladkém povrchu, byly vyrobeny také zkušební destičky s hladkým povrchem na druhé vstřikovací formě (viz. Obr. 3.6).



*Obr. 3.6 Výměnná vložka vstřikovací formy pro hladké zkušební destičky*



### 3.3 Volba vstřikovacího stroje

Pro výrobu zkušebních těles na hodnocení povrchových vlastností bionických dezénů jsme vybrali vstřikovací stroj ARBURG ALLROUNDER 270S 400-100 (viz. Obr. 3.7). Jeho podrobné technické parametry jsou v tabulce 3.1.



Obr. 3.7 Vstřikovací stroj ARBURG ALLROUNDER 270S 400-100

Tab. 3.1: Technologické parametry vstřikovacího stroje ARBURG 270S [29]

#### **Vstřikovací jednotka**

Průměr šneku	mm	20	25	30
Délka šneku	L/D	25	20	16,7
Zdvih dávkování	mm		100	
Otáčky šneku max.	m/min <sup>-1</sup>	28	35	42
Plastifikační výkon měřeno pro PS podle norem	kg/hod	5,5	8	9,5
Vstřikované množství teoretické hodnoty	cm <sup>3</sup> /s	64	100	146
Maximální objem zdvihu	cm <sup>3</sup>	31	49	71
Max. hmotnost výlisku, vztaženo na PS (Euromap 19)	g	29	45	65
Specifický vstřikovací tlak	bar	2500	2000	1390
Zvýšený specifický vstřikovací tlak	bar			
Zdvih agregátu × přídržná síla trysky	mm×kN		180 × 50	
Instalovaný příkon topení plastifikačního válce	kW		4,9	
Počet topných pásů			4	

#### **Uzavírací jednotka**

Uzavírací síla	kN	400
----------------	----	-----

Dráha otevření lisovacího nástroje	mm	350
Vestavěná výška formy min	mm	200
Max. otevření upínacích desek	mm	500
Velikost upínacích desek horizontální × vertikální	mm	380 x 380
Zvětšené upínací desky horizontální × vertikální	mm	380 x 380
Vzdálenost mezi sloupky horizontální × vertikální	mm	270 x270
Šířka vypadávací šachty	mm	300
Zdvih vyhazovače × síla vyhazovače	mm×kN	100 x 20
Běh naprázdno dle Euromap 6 x zdvih	s x mm	1, 2 x 189

### 3.4 Technologické parametry výroby zkušebních těles vstřikováním

Poté co jsme si připravili granuláty jednotlivých materiálů, vybrali vstřikovací stroj a upnuli do něj vstřikovací formu, můžeme přejít k samotnému výrobnímu procesu.

Na základě provedených několika pokusů byl zvolen u každého druhu plastu zvyšující se teplotní profil tavící komory vstřikovacího stroje (viz. Tab. 3.2, 3.5 a 3.8). Technologické parametry vstřikování jednotlivých druhů destiček jsou zobrazeny v tabulkách 3.3, 3.4, 3.6, 3.7, 3.9 a 3.10.

- Parametry výroby zkušebních destiček z PP:

*Tab. 3.2: Nastavení teplotního profilu tavící komory vstřikovacího stroje*

	násypka	4. zóna	3. zóna	2. zóna	1. zóna	tryska
Teplota [°C]	40	190	220	230	235	240

Tab. 3.3: Technologické podmínky vstřikování PP destiček s bionikou

parametr	hodnota	jednotka
Vstřikovací rychlost	30	[cm <sup>3</sup> /s]
Objem dávky	40	[cm <sup>3</sup> ]
Objem při přepnutí	14	[cm <sup>3</sup> ]
Velikost dotlaku	160	[bar]
Doba dotlaku	25	[s]
Doba chlazení	10	[s]
cyklus	45	[s]

Tab. 3.4: Technologické podmínky vstřikování PP hladkých destiček

parametr	hodnota	jednotka
Vstřikovací rychlost	30	[cm <sup>3</sup> /s]
Objem dávky	32	[cm <sup>3</sup> ]
Objem při přepnutí	13	[cm <sup>3</sup> ]
Velikost dotlaku	160	[bar]
Doba dotlaku	15	[s]
Doba chlazení	10	[s]
cyklus	35	[s]

- Parametry výroby zkušebních destiček z ABS:

Tab. 3.5: Nastavení teplotního profilu tavící komory vstřikovacího stroje

	násypka	4. zóna	3. zóna	2. zóna	1. zóna	tryska
Teplota [°C]	40	200	230	240	245	250

Tab. 3.6: Technologické podmínky vstřikování ABS destiček s bionikou

parametr	hodnota	jednotka
Vstřikovací rychlost	30	[cm <sup>3</sup> /s]
Objem dávky	40	[cm <sup>3</sup> ]
Objem při přepnutí	14	[cm <sup>3</sup> ]
Velikost dotlaku	400	[bar]
Doba dotlaku	16	[s]
Doba chlazení	25	[s]
cyklus	51	[s]

Tab. 3.7: Technologické podmínky vstřikování ABS hladkých destiček

parametr	hodnota	jednotka
Vstřikovací rychlost	30	[cm <sup>3</sup> /s]
Objem dávky	32	[cm <sup>3</sup> ]
Objem při přepnutí	13	[cm <sup>3</sup> ]
Velikost dotlaku	400	[bar]
Doba dotlaku	13	[s]
Doba chlazení	10	[s]
cyklus	33	[s]

- Parametry výroby zkušebních destiček z PA6:

Tab. 3.8: Nastavení teplotního profilu tavící komory vstřikovacího stroje

	násypka	4. zóna	3. zóna	2. zóna	1. zóna	tryska
Teplota [°C]	40	240	250	255	260	265



*Tab. 3.9: Technologické podmínky vstřikování PA6 destiček s bionikou*

parametr	hodnota	jednotka
Vstřikovací rychlost	30	[cm <sup>3</sup> /s]
Objem dávky	40	[cm <sup>3</sup> ]
Objem při přepnutí	14	[cm <sup>3</sup> ]
Velikost dotlaku	400	[bar]
Doba dotlaku	12	[s]
Doba chlazení	25	[s]
cyklus	45	[s]

*Tab. 3.10: Technologické podmínky vstřikování PA6 hladkých destiček*

parametr	hodnota	jednotka
Vstřikovací rychlost	30	[cm <sup>3</sup> /s]
Objem dávky	32	[cm <sup>3</sup> ]
Objem při přepnutí	13	[cm <sup>3</sup> ]
Velikost dotlaku	500	[bar]
Doba dotlaku	15	[s]
Doba chlazení	15	[s]
cyklus	40	[s]

Pro každý druh polymeru bylo vyrobeno 10 kusů zkušebních destiček s bionickým dezénem (viz. Obr. 3.8) a 10 kusů destiček s hladkým povrchem (viz. Obr. 3.9).



*Obr. 3.8 ABS destička se čtyřmi druhy bionického dezénu*



*Obr. 3.9 ABS destička s hladkým povrchem*

### 3.5 Měření povrchových vlastností

Když jsme si vyrobili požadované množství zkušebních destiček, mohli jsme přejít k samotnému měření povrchových vlastností pomocí smáčivosti. Ta se měří na přístroji vybaveném CCD snímací kamerou s následnou softwarovou podporou.

Dále jsme potřebovali mikropipetu, pomocí které jsme mohli dávkovat měřicí kapaliny. Také jsme si stanovili a pojmenovali pro přehlednost jednotlivé oblasti měření na destičkách (viz. Obr. 3.10), takže následující měřené reliéfy nesou vždy název polymeru, číslo zvětšení a způsob měření.



*Obr. 3.10 Rozdělení a pojmenování oblastí*

#### 3.5.1 Zvolené kapaliny

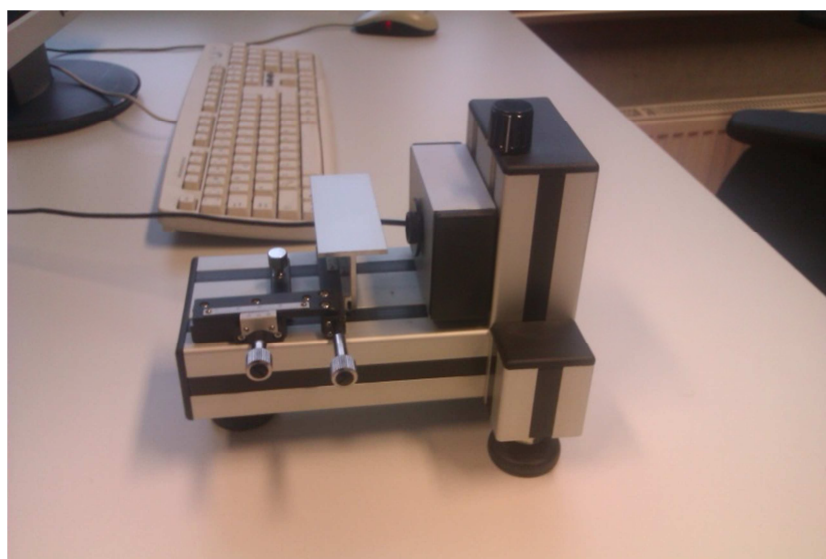
Jako měřicí kapaliny pro stanovení kontaktního úhlu smáčení na bionických dezénech byly použity tři kapaliny: redestilovaná voda, etylenglykol a glycerol. Jejich základní hodnoty jsou uvedeny v tabulce (viz. Obr. 3.11).

KAPALINA	HUSTOTA $\rho$ [g / cm <sup>-3</sup> ]	VISKOZITA $\eta$ [mPa.s]	POVRCH. NAPĚTÍ $\gamma$ [mN / m]	DISPERZNÍ PODÍL $\gamma^d$ [mN / m]	POLÁRNÍ PODÍL $\gamma^p$ [mN / m]
redestil. VODA (H <sub>2</sub> O)	0,998	1,002	72,8	26,0	46,8
GLYCEROL (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub> )	1,263	924,7	65,2	28,3	36,9
ETHYLENGLYKOL (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub> )	1,109	21,81	47,7	26,4	21,3

*Obr. 3.11 Základní charakteristiky použitých kapalin [23]*

### 3.5.2 Měření kontaktního úhlu smáčení metodou sedící kapky

Vzorky měřicích kapalin byly nanášeny mikropipetou na povrch polymerních destiček ve formě kapek o objemu 4 $\mu$ l. Tento malý objem kapky zajistil, že nedocházelo k deformaci kapky vlivem gravitace, a proto mohla být použita tříbodová metoda, která je součástí měřicího softwaru. K následnému vyhodnocení kontaktního úhlu smáčení byl využit Surface Energy Evalution System 6.3 (SEE System) (viz. Obr. 3.12).



*Obr. 3.12 Přístroj Surface Energy Evalution System 6.3*



Měřené destičky se umístily na pracovní stůl přístroje SEE System a pomocí polohovacích šroubů se nastavily tak, aby se plocha s kapkou nacházela uprostřed zorného pole kamery a byla k ní kolmá. Pomocí manipulačních šroubů se pohled kamery doostřil tak, aby byl v SEE Software jasně zřetelný obrys kapky a místo kontaktu kapaliny s povrchem destičky. Dobře zaostřená kapka se vyfotila a byla uložena pro další zpracování.

Na dávkování kapek byla použita mikropipeta Biohit Proline Mechanical s nastavitelným objemem (viz Obr. 3.13). Její vyměnitelná špička umožnila použití několika vzorků kapalin, bez nutnosti důkladného čištění při každé změně média. Navíc byla natolik velká, že u malých objemů kapek adhezní síla mezi kapkou a špičkou bránila odtržení kapky gravitací. K samovolnému odtržení došlo u objemu nad 8  $\mu\text{l}$ , což už byl objem, který nevyhovoval kvůli deformaci kapky vlivem gravitace a výsledky měření by tak byly zkreslené.

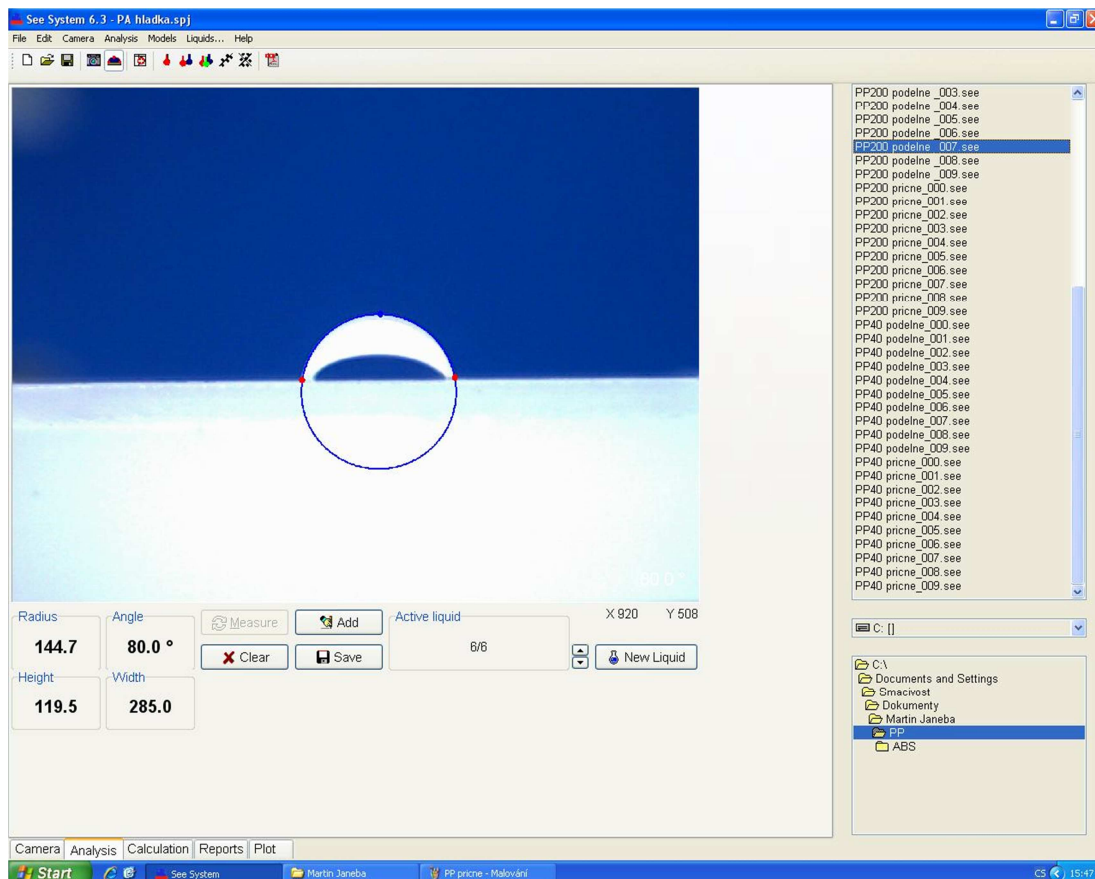


*Obr. 3.13 mikropipeta Biohit Proline Mechanical*

### **3.5.3 Softwarové rozhraní (SEE System) a naměřené hodnoty**

Uložené snímky sedících kapek byly dále hodnoceny v programu SEE Software (viz. Obr. 3.14). K zachycenému snímku se přiřadila použitá kapalina a poznamenal se druh zkoušeného povrchu. Pomocí myši se do obrazu nastavily minimálně tři body, první a druhý označil třífázové rozhraní a třetí se umístil na obrys kapky, nejlépe na její vrchol. Z těchto tří bodů program sestrojil k dané kapce opsanou kružnici, která by měla charakterizovat tvar kapky. Pokud kružnice nekopírovala přesně obrys kapky, bylo potřeba provést korekci přidáním více bodů,

nebo odstraněním a posunutím chybných bodů. Z informací o opsané kružnici a rovině povrchu program automaticky vypočítal velikost kontaktního úhlu smáčení  $\theta$ , pomocí tangenty opsané kružnice.



*Obr. 3.14 Softwarové prostředí SEE System. Nanesená kapka na studovaném povrchu a zjištění hodnoty kontaktního úhlu metodou tří bodů.*

Měření bylo prováděno za normálních podmínek (atmosférický tlak a teplota cca 21°C) na více zkušebních destičkách, aby se zabránilo vzniku případných chyb vzniklých z nečistot na povrchu. Zároveň byla kapka snímána a uložena vždy až po 10 sekundách, aby měla dostatečný čas, který je nezbytný pro ustálení kapaliny do rovnovážného stavu. Čím větší je viskozita kapaliny, tím vzrůstá i čas potřebný na ustálení.

Na každém hodnoceném povrchu bylo postupně vykonáno osm měření. Z těchto měření pak bylo vybráno šest, které jsou přehledně zaznamenány v tabulkách 3.11 – 3.19. Následně pro každý materiál a všechny jeho měření

povrchy byla spočítána střední hodnota a stanovena směrodatná odchylka. Tyto výsledky jsou přehledně zpracovány v kapitole 4 Měření a vyhodnocení výsledků.

- Nejprve jsme měřily kontaktní úhly smáčení pomocí kapiček vody. Naměřené hodnoty pro jednotlivé materiály jsou zaznamenány v následujících tabulkách 3.11, 3.12 a 3.13. Na obrázku 3.15 je zaznamenán příklad chování kapičky vody na povrchu z materiálu ABS měřený příčně.

*Tab. 3.11: Naměřené kontaktní úhly kapiček vody na materiálu PP*

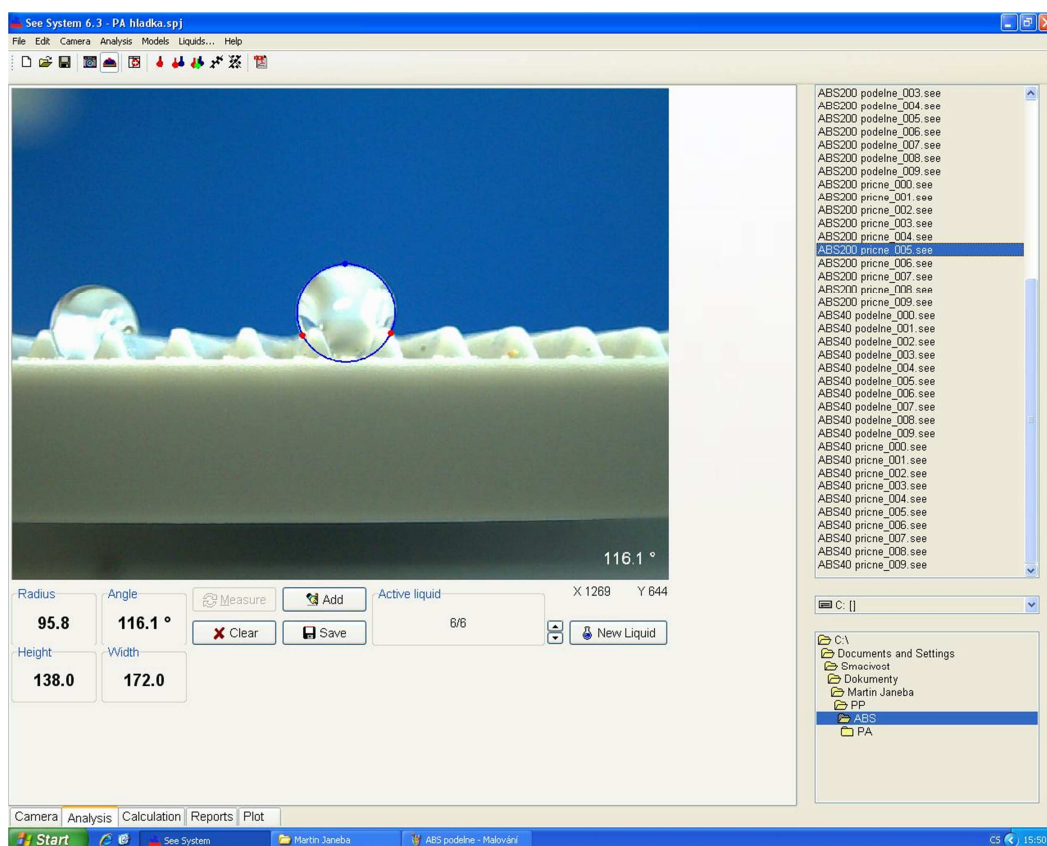
voda	$\theta$ [°]					
materiál	1	2	3	4	5	6
PP hladká	89,336	90,516	89,012	88,533	91,457	92,125
PP40 podélné	92,204	93,585	96,843	92,678	95,811	86,395
PP40 příčné	119,040	120,571	119,395	122,377	121,911	120,374
PP100 podélné	92,196	93,360	92,549	95,558	92,847	96,401
PP100 příčné	115,567	113,625	110,917	115,800	115,695	118,388

*Tab. 3.12: Naměřené kontaktní úhly kapiček vody na materiálu ABS*

voda	$\theta$ [°]					
materiál	1	2	3	4	5	6
ABS hladká	80,433	82,437	78,154	78,580	81,401	79,536
ABS40 podélné	84,977	80,255	84,185	86,126	87,813	84,042
ABS40 příčné	109,120	109,693	106,670	107,865	104,936	109,841
ABS100 podélné	84,834	80,481	80,116	85,588	82,728	84,613
ABS100 příčné	100,108	102,241	100,947	102,447	106,627	105,140

*Tab. 3.13: Naměřené kontaktní úhly kapiček vody na materiálu PA*

voda	$\theta$ [°]					
materiál	1	2	3	4	5	6
PA hladká	72,513	71,878	73,674	75,521	75,872	75,652
PA40 podélné	105,164	108,685	105,217	102,201	105,251	108,405
PA40 příčné	115,368	112,420	115,246	117,552	117,121	115,590
PA100 podélné	92,196	93,360	92,549	92,884	95,558	92,847
PA100 příčné	119,623	122,429	121,424	120,307	115,534	116,857



Obr. 3.15 Kapička vody měřená příčně v softwaru SEE System na povrchu destičky z ABS.

- Měření kontaktních úhlů smáčení pomocí kapiček glycerínu. Naměřené hodnoty pro jednotlivé materiály jsou zaznamenány v tabulkách 3.14, 3.15 a 3.16. Na obrázku 3.16 je zaznamenán příklad chování kapičky glycerínu na povrchu z materiálu PP s velikostí reliéfu 40 měřený příčně.

Tab. 3.14: Naměřené kontaktní úhly kapiček glycerínu na materiálu PP

glycerin	$\theta$ [°]					
materiál	1	2	3	4	5	6
PP hladká	75,335	73,519	75,027	68,385	73,665	72,878
PP40 podélné	76,418	69,858	69,806	71,927	79,799	73,551
PP40 příčné	113,801	112,546	110,487	110,643	108,846	111,323
PP100 podélné	91,308	95,059	95,229	84,629	92,395	91,785
PP100 příčné	111,257	108,083	108,935	103,054	108,307	105,366

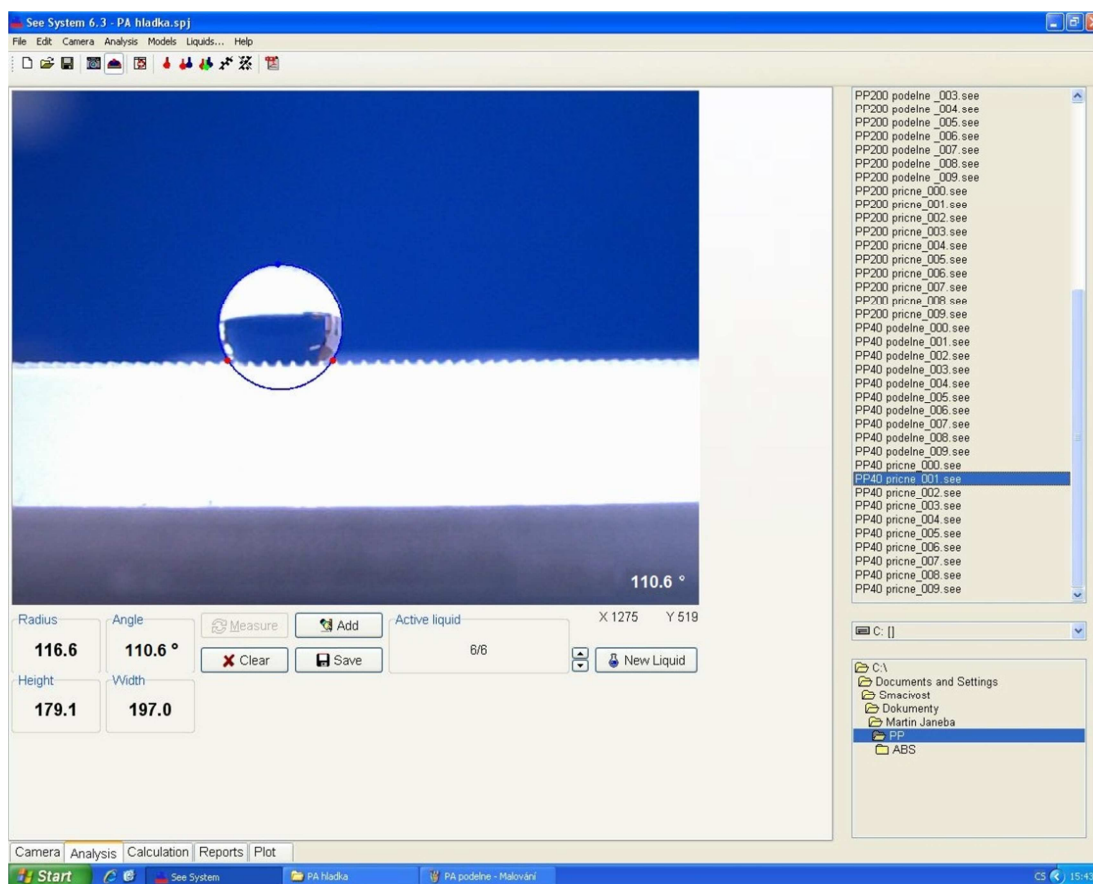


Tab. 3.15: Naměřené kontaktní úhly kapiček glycerínu na materiálu ABS

glycerin	$\theta$ [°]					
materiál	1	2	3	4	5	6
ABS hladká	71,420	73,028	71,982	74,492	71,792	72,028
ABS40 podélné	70,042	71,849	73,746	68,615	70,201	71,559
ABS40 příčné	103,425	103,870	105,144	104,496	103,022	104,961
ABS100 podélné	55,659	57,209	57,337	60,943	58,080	59,280
ABS100 příčné	95,333	96,480	98,262	96,269	104,022	99,453

Tab. 3.16: Naměřené kontaktní úhly kapiček glycerínu na materiálu PA

glycerin	$\theta$ [°]					
materiál	1	2	3	4	5	6
PA hladká	67,418	68,123	68,350	67,201	65,612	67,300
PA40 podélné	91,672	84,137	90,245	90,266	86,975	87,333
PA40 příčné	111,628	108,399	110,765	109,952	110,873	109,221
PA100 podélné	86,160	83,330	83,974	76,481	79,241	81,241
PA100 příčné	100,393	95,858	97,180	102,861	103,078	101,989



Obr. 3.16 Kapička glycerínu měřená příčně v softwaru SEE System na povrchu destičky z PP s velikostí reliéfu 40.

- Měření kontaktních úhlů smáčení pomocí kapiček etylenglykolu. Naměřené hodnoty pro jednotlivé materiály jsou zaznamenány v tabulkách 3.17, 3.18 a 3.19. Na obrázku 3.17 je zaznamenán příklad chování kapičky etylenglykolu na povrchu z materiálu PA6 s velikostí reliéfu 40 měřený podélně.

*Tab. 3.17: Naměřené kontaktní úhly kapiček etylenglykolu na materiálu PP*

etylenglykol	$\theta$ [°]					
materiál	1	2	3	4	5	6
PP hladká	53,823	57,110	56,561	57,226	55,854	56,456
PP40 podélné	40,601	43,504	42,013	42,121	43,221	41,125
PP40 příčné	74,642	74,852	78,280	75,656	76,255	77,665
PP100 podélné	44,730	45,270	47,469	46,632	45,332	47,029
PP100 příčné	48,185	52,028	50,750	50,985	51,021	51,114

*Tab. 3.18: Naměřené kontaktní úhly kapiček etylenglykolu na materiálu ABS*

etylenglykol	$\theta$ [°]					
materiál	1	2	3	4	5	6
ABS hladká	58,990	58,194	58,571	59,093	58,580	58,458
ABS40 podélné	50,688	48,227	52,527	52,189	51,322	51,648
ABS40 příčné	69,761	76,330	71,306	68,021	66,076	68,061
ABS100 podélné	21,384	22,342	31,675	23,522	22,756	24,300
ABS100 příčné	61,434	60,834	61,677	61,543	57,855	59,441

*Tab. 3.19: Naměřené kontaktní úhly kapiček etylenglykolu na materiálu PA*

etylenglykol	$\theta$ [°]					
materiál	1	2	3	4	5	6
PA hladká	57,901	56,454	57,680	55,723	55,272	56,033
PA40 podélné	67,714	69,324	72,620	66,639	75,604	71,323
PA40 příčné	99,465	99,675	98,607	100,823	98,996	100,011
PA100 podélné	53,035	53,492	52,419	58,981	55,168	56,612
PA100 příčné	98,011	97,011	102,701	104,700	101,006	98,657



## 4 VYHODNOCENÍ A DISKUZE VÝSLEDKŮ

Z hodnot získaných na základě experimentálního měření v předešlé kapitole byly pro každou kapalinu a každý materiál vypočteny střední hodnoty měření a stanovena směrodatná odchylka. Z těchto středních hodnot pak byly sestrojeny tři typy grafů popisující vlastnosti povrchu z hlediska druhu materiálu a tři typy grafů popisující vlastnosti povrchu z hlediska nanášené kapaliny.

Se zkouškami na bionickém povrchu, který má zvětšení 300x oproti původnímu reliéfu mechu, se nepočítalo již od začátku. Sloužil především jako dobrý názorný příklad detailu struktury. Během měření bylo zjištěno, že i povrch, který je zvětšený 200x příliš nevyhovuje metodě měření statických kontaktních úhlů smáčení. Jeho povrchový reliéf je příliš hluboký a při podélném snímání kapek kolmo k rovině bylo vidět jen jejich vrchol. Naměřený úhel byl velmi malý, výsledky ukazovali dobrou hydrofilii, přestože při pohledu z vrchu bylo vidět kapičky v jejich téměř kulovitěm tvaru. Z tohoto důvodu výsledky naměřené na tomto povrchu v této práci neuvádíme.

### 4.1 Vyhodnocení povrchů smáčených vodou

Z naměřených údajů byly vypočteny střední hodnoty a stanoveny směrodatné odchylky (viz. Tab. 4.1, 4.2 a 4.3). Z těchto středních hodnot byl vytvořen graf závislosti kontaktních úhlů smáčení vody na jednotlivých materiálech pro různé typy povrchu (viz. Obr. 4.1).

*Tab. 4.1 Přehled středních hodnot a směrodatných odchylek pro vodu na destičkách*

*z PP*

materiál	střední hodnota	směr.odchylka
PP hladká	90,163	1,436
PP40 podélné	92,919	3,670
PP40 příčné	120,611	1,328
PP100 podélné	93,819	1,737
PP100 příčné	114,999	2,509

Tab. 4.2 Přehled středních hodnot a směrodatných odchylek pro vodu na destičkách

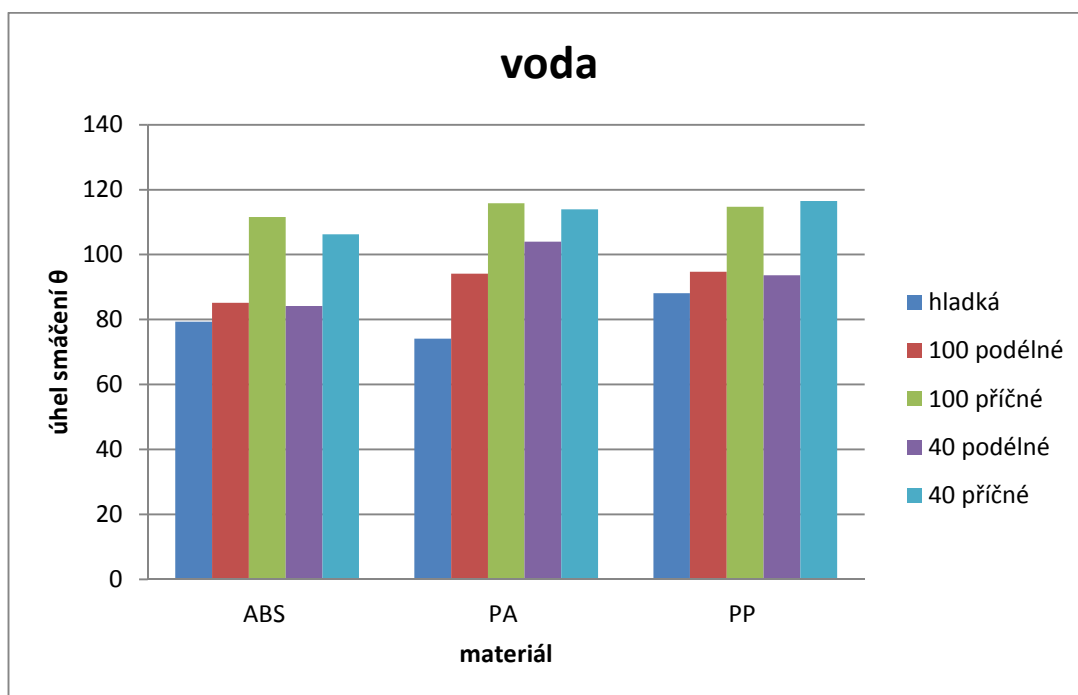
z ABS

materiál	střední hodnota	směr.odchylka
ABS hladká	80,090	1,654
ABS40 podélné	84,566	2,536
ABS40 příčné	108,021	1,933
ABS100 podélné	83,060	2,340
ABS100 příčné	102,918	2,496

Tab. 4.3 Přehled středních hodnot a směrodatných odchylek pro vodu na destičkách

z PA6

materiál	střední hodnota	směr.odchylka
PA hladká	74,185	1,741
PA40 podélné	105,821	2,413
PA40 příčné	115,550	1,811
PA100 podélné	93,232	1,203
PA100 příčné	119,362	2,666



Obr. 4.1 Závislost úhlu smáčení vody na jednotlivých polymerních materiálech pro různé typy povrchu

Kontaktní úhel smáčení vody na bionických reliéfech byl u každého polymeru větší než na hladkých destičkách jak ukazuje graf. Podélná měření

vycházela podstatně lépe, než příčná. Bylo to způsobeno tvarem povrchu, kdy se v podélné poloze mohli kapičky pohybovat v drážkách, kdežto u příčné držely tvar v úzkém ohraničení. Reliéfy tak naopak vůči předpokladům vodu odpuzují, místo aby byly více hydrofilní.

## 4.2 Vyhodnocení povrchů smáčených glycerínem

Z naměřených údajů byly vypočteny střední hodnoty a stanoveny směrodatné odchylky (viz. Tab. 4.4, 4.5 a 4.6). Z těchto středních hodnot byl vytvořen graf závislosti kontaktních úhlů smáčení glycerínu na jednotlivých materiálech pro různé typy povrchu (viz. Obr. 4.2).

*Tab. 4.4 Přehled středních hodnot a směrodatných odchylek pro glycerin na destičkách z PP*

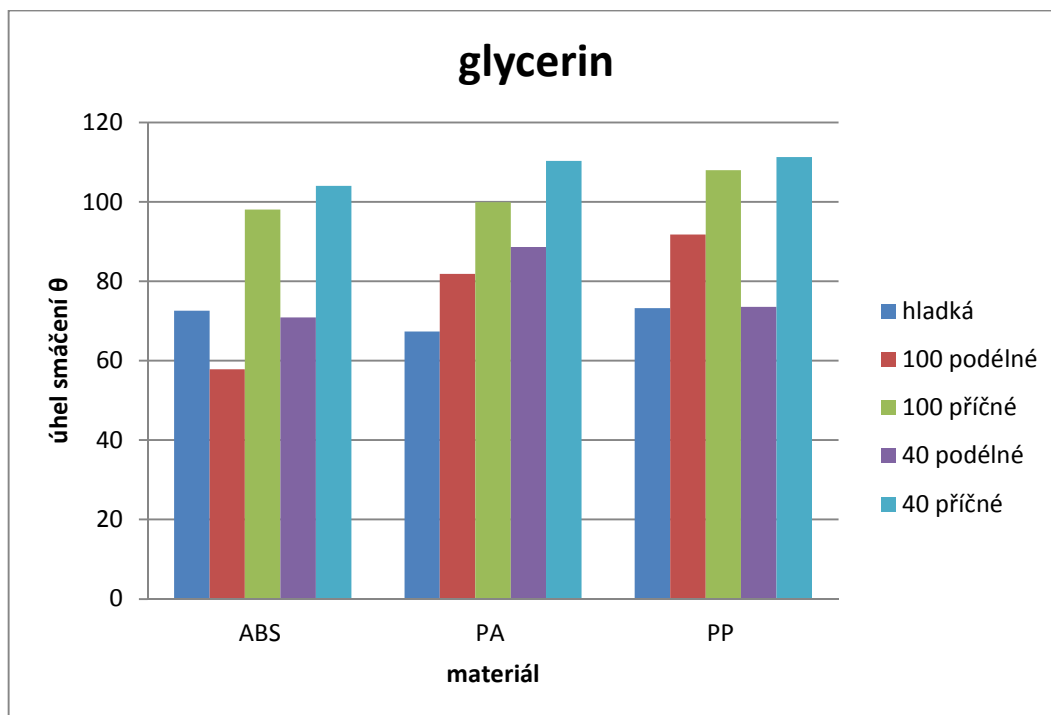
materiál	střední hodnota	směr.odchylka
PP hladká	73,135	2,509
PP40 podélné	73,560	3,938
PP40 příčné	111,274	1,727
PP100 podélné	91,734	3,857
PP100 příčné	107,500	2,880

*Tab. 4.5 Přehled středních hodnot a směrodatných odchylek pro glycerin na destičkách z ABS*

materiál	střední hodnota	směr.odchylka
ABS hladká	72,457	1,131
ABS100 podélné	58,085	1,833
ABS100 příčné	98,303	3,172
ABS40 podélné	71,002	1,779
ABS40 příčné	104,153	0,853

Tab. 4.6 Přehled středních hodnot a směrodatných odchylek pro glycerin na destičkách z PA6

materiál	střední hodnota	směr.odchylka
PA hladká	67,334	0,964
PA40 podélné	88,438	2,790
PA40 příčné	110,140	1,188
PA100 podélné	81,738	3,499
PA100 příčné	100,227	3,052



Obr. 4.2 Závislost úhlu smáčení glycerinu na jednotlivých polymerních materiálech pro různé typy povrchu

Měření kontaktních úhlů smáčení glycerínu má podobné výsledky jako voda. Destičky z PP i PA mají naměřené úhly smáčení vyšší než na hladkém povrchu. Pouze u destiček z ABS vykazovali podélná měření nižší úhel smáčení, než byl naměřený u hladkých povrchů, ale vysoký úhel u příčného měření lepší hydrofobii vyvrací. U glycerínu materiály celkově vykazují nižší kontaktní úhly smáčení než u vody a tudíž lepší smáčení. Hodnoty se přesto pohybují na rozhraní špatné smáčivosti (viz. teoretická část této diplomové práce).

### 4.3 Vyhodnocení povrchů smáčených etylenglykolem

Z naměřených údajů byly vypočteny střední hodnoty a stanoveny směrodatné odchylky (viz. Tab. 4.7, 4.8 a 4.9). Z těchto středních hodnot byl vytvořen graf závislosti kontaktních úhlů smáčení etylenglykolu na jednotlivých materiálech pro různé typy povrchu (viz. Obr. 4.3).

*Tab. 4.7 Přehled středních hodnot a směrodatných odchylek pro etylenglykol na destičkách z PP*

materiál	střední hodnota	směr.odchylka
PP hladká	56,172	1,252
PP40 podélné	42,078	1,134
PP40 příčné	76,225	1,484
PP100 podélné	46,077	1,111
PP100 příčné	50,681	1,300

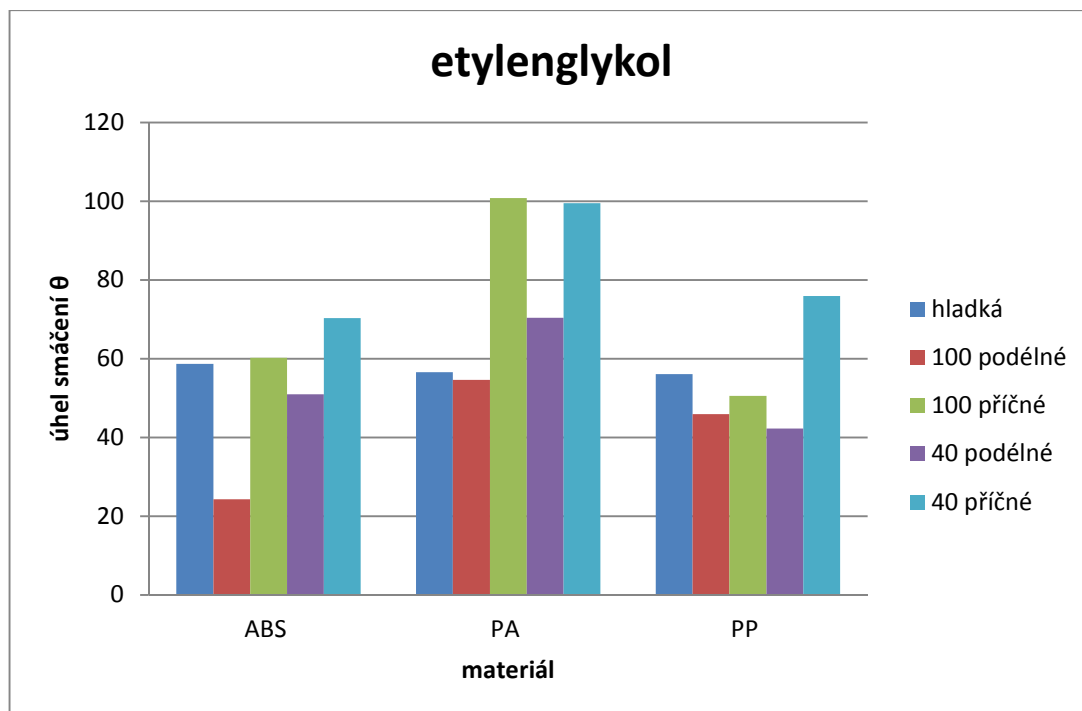
*Tab. 4.8 Přehled středních hodnot a směrodatných odchylek pro etylenglykol na destičkách z ABS*

materiál	střední hodnota	směr.odchylka
ABS hladká	58,648	0,337
ABS100 podélné	24,330	3,734
ABS100 příčné	60,464	1,521
ABS40 podélné	51,100	1,549
ABS40 příčné	69,926	3,602

*Tab. 4.9 Přehled středních hodnot a směrodatných odchylek pro etylenglykol na destičkách z PA6*

materiál	střední hodnota	směr.odchylka
PA hladká	56,511	1,066
PA40 podélné	70,537	3,325
PA40 příčné	99,596	0,780
PA100 podélné	54,951	2,500
PA100 příčné	100,348	2,979



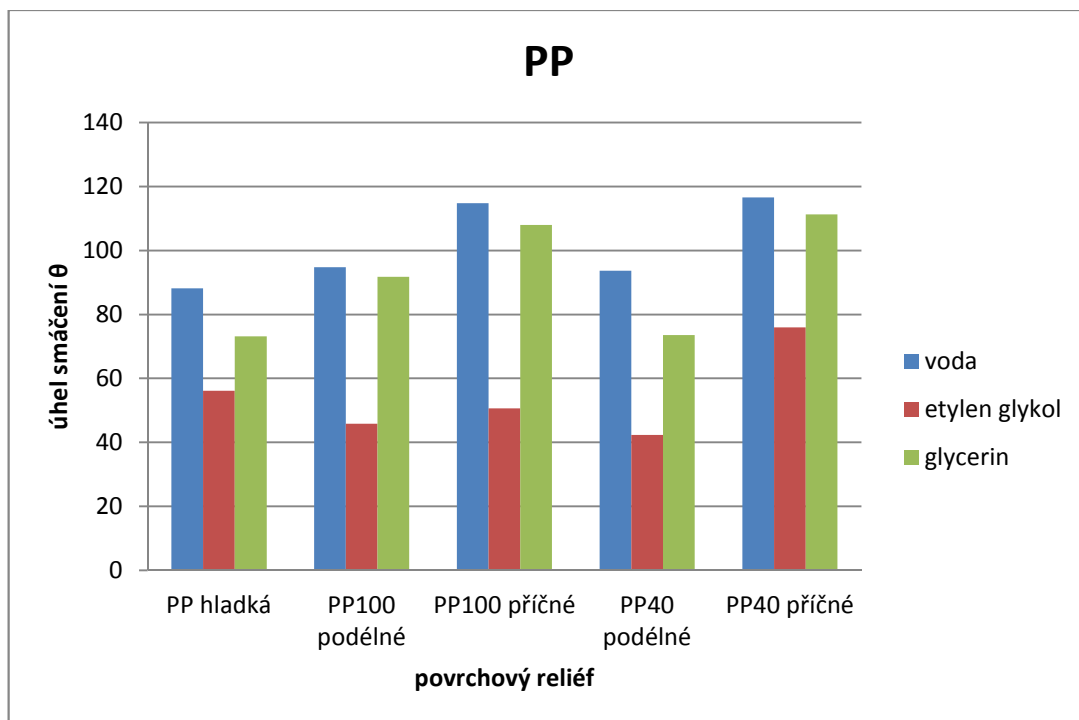


*Obr. 4.3 Závislost úhlu smáčení etylenglykolu na jednotlivých polymerních materiálech pro různé typy povrchu*

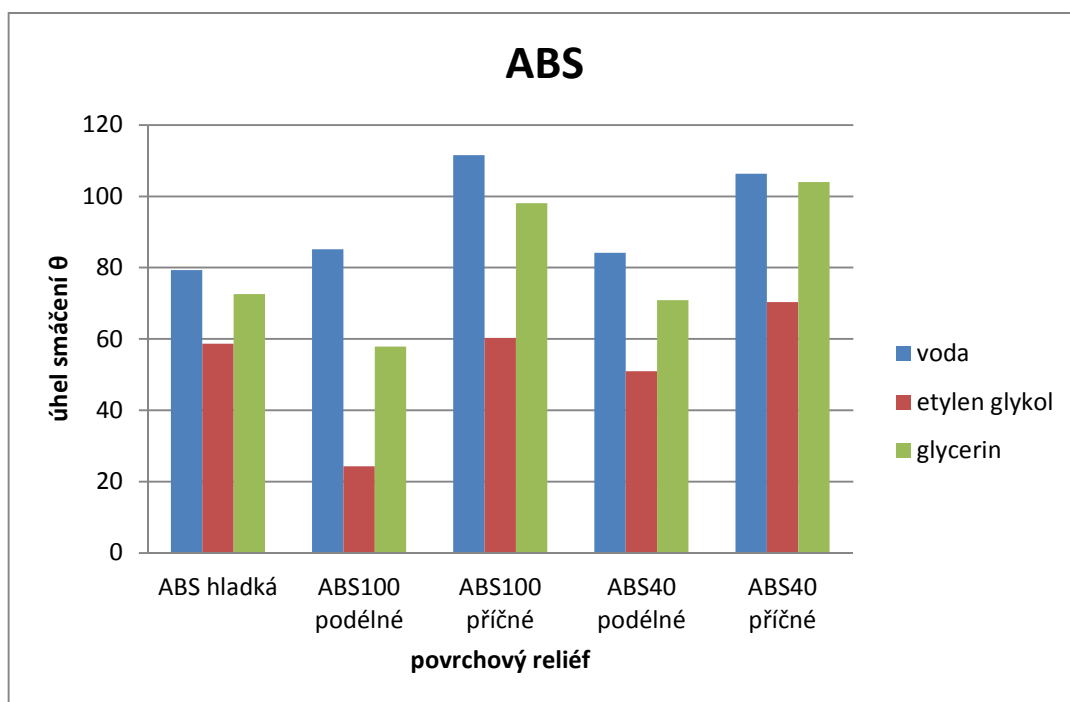
Nejlepších výsledků bylo dosaženo při měření kontaktních úhlů smáčení pomocí etylenglykolu. U destiček z polypropylenu, vykazoval reliéf 100 nižší hodnoty úhlu smáčení u obou měření (podélné i příčné), než u hladkých destiček. Byl to tak jediný případ, kdy se podařilo dosáhnout našeho cíle, tj. u nepolárního plastu získat polaritu pomocí přírodního reliéfu. U reliéfu se zvětšením 40 na tomto plastu mělo podélné měření rovněž nízké hodnoty, ale příčné bylo o několik řádů vyšší. Dobré výsledky byly patrné u 100x zvětšeného reliéfu i na destičkách z ABS, kdy podélné měření mělo dokonce nejnížší hodnoty ze všech naměřených úhlů. Je to ale dáno především velmi nízkou viskozitou měřeného média (viz. Obr. 3.11).

#### **4.4 Vyhodnocení vlastností povrchů jednotlivých materiálů**

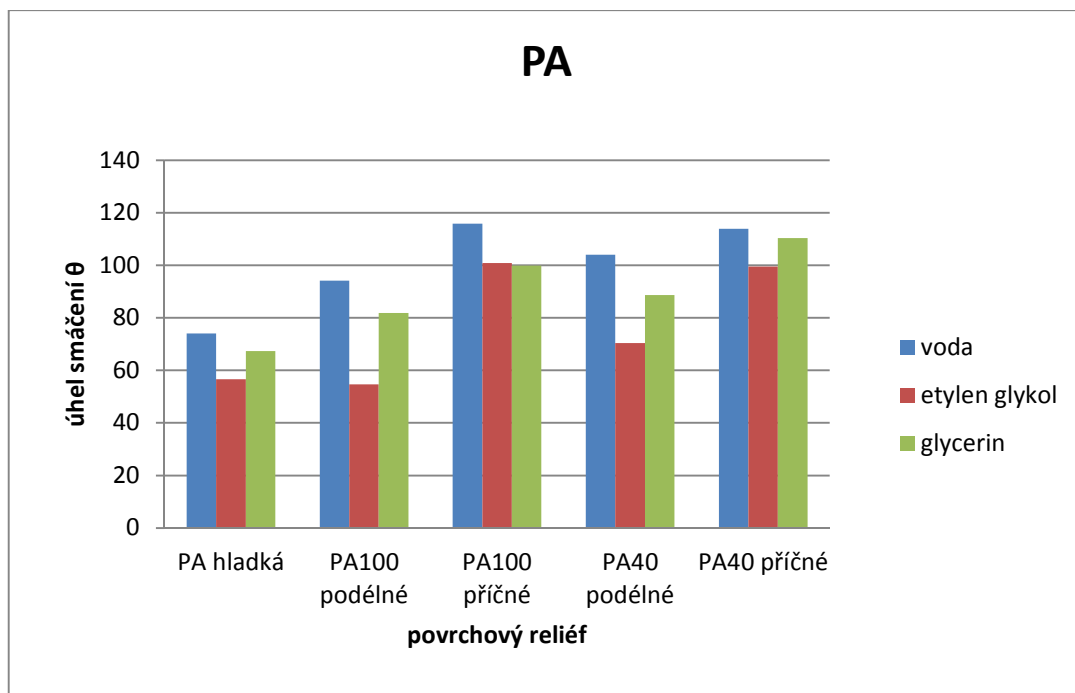
V této kapitole jsou ze středních hodnot úhlů smáčení měřených kapalin vytvořeny přehledné grafy, které ukazují závislost úhlu smáčení všech použitých kapalin na typu reliéfu pro každý plast samostatně (viz. Obr. 4.4, 4.5 a 4.6).



*Obr. 4.4 Závislost úhlu smáčení u polypropylenu na jednotlivých typech reliéfů pro různé kapaliny*



*Obr. 4.5 Závislost úhlu smáčení u akrylonitryl-butadien-styrenu na jednotlivých typech reliéfů pro různé kapaliny*



Obr. 4.6 Závislost úhlu smáčení u polyamidu na jednotlivých typech reliéfů pro různé kapaliny

Z grafů je patrné, že všechny tři materiály byly nejhůře smáčeny vodou. Kontaktní úhly smáčení vodou se nejlépe pohybovaly u povrchů na materiálu z ABS, kde byly mírně pod hranicí  $90^\circ$ , což je mezní hranice mezi dobrým smáčením a špatným smáčením. U materiálu PP a PA byly tyto úhly již nad touto hranicí a proto je můžeme hodnotit jako špatně smáčivé. U měření kontaktních úhlů s glycerinem vycházelo všeobecně lepší smáčení než u vody, ale hodnoty byly stále poměrně vysoké. Naopak u měření s etylenglykolem vycházeli kontaktní úhly smáčení u všech materiálů nejnižší. Nejlepší smáčení jsme zjistili u bionického povrchu na polypropylenu, kde se hodnoty pohybovaly kolem  $40^\circ$ .

## 5 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo popsat technologii výroby bionických dezénů na plastových dílech, přiblížení současného stavu aplikace povrchů inspirovaných přírodou a hodnocení povrchových vlastností bionického dezénu analogického k povrchu přírodního mechu.

Teoretická část se zabývá popisem základních vlastností a charakteristiky plastových materiálů, popisem technologie vstřikování termoplastů a vstřikovacích forem. Dále je pojednáno o struktuře, vlastnostech a analogickém využití některých bionických povrchů. Na závěr teoretické části je popsána problematika smáčení pevných povrchů.

Experimentální část zahrnuje popis výroby zkušebních destiček ze třech druhů plastů s rozdílnou polaritou a laboratorní měření kontaktních úhlů smáčení na bionickém dezénu.

Kontaktní úhly byly měřeny jak na bionických dezénech, tak na hladkém povrchu. Z naměřených hodnot vyplývá, že uměle vytvořený bionický povrch inspirovaný mechem nezískal jeho hydrofilní vlastnosti, jak se předpokládalo. Naměřené úhly jsou ve většině případů dokonce vyšší než u hladkého povrchu. Nejlépe vycházel povrch, který byl 100x zvětšený oproti přírodnímu obrazu. Jeho struktura ostrých hran narušovala kapky a ty tak mohli lépe smáčet povrch. Tento jev byl patrný hlavně při podélném měření. U příčného měření bylo zjevné, že kapky nemohou dále ustupovat a zůstávají usedlé v ohraničení, které jim udával povrch.

Bionický povrch se tak choval spíše jako hydrofobní, než hydrofilní, navzdory jeho analogii s vysoce hydrofilním mechem. Z těchto výsledků je patrné, že pro změnu vlastností nestačí pouze napodobení reliéfu, ale je nutné i určité chemické ošetření, protože ani mech nezískal svou hydrofilii jen strukturou povrchu, ale také svým celulóзовým složením.

## Seznam použité literatury

- [1] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. [online]. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006, s. 280. [cit. 2013-05-18]. ISBN 80-7080-617-6. Dostupné z: [http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid\\_isbn-80-7080-617-6/pages-img/obalka-1.html](http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_isbn-80-7080-617-6/pages-img/obalka-1.html)
- [2] KREBS, Josef. *Teorie zpracování nekovových materiálů*. Vyd. 3. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2006, 250 s. ISBN 80-737-2133-3.
- [3] SOVA, Miloš. *Termoplasty v praxi: Praktická příručka pro: konstruktéry, výrobce, zpracovatele a uživatele termoplastů. Výběr materiálů. Konstrukční návrhy. Výroba nástrojů. Technologické postupy* [online]. Praha: Verlag Dashoefer, 2001 [cit. 2013-05-20]. Dostupné z: <http://www.techportal.cz/1/1/historie-vyvoje-a-uzivani-termoplastu-cid33877/>
- [4] KOCH, Kerstin, Bharat BHUSHAN a Wilhelm BARTHLOTT. *Multifunctional surface structures of plants: An inspiration for biomimetics. Progress in Materials Science* [online]. 2009, vol. 54, issue 2, s. 137-178 [cit. 2013-05-14]. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2008.07.003. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0079642508000704>
- [5] LENFELD, Petr. *Technologie II*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 20052006, 138 s. ISBN 80-737-2037-X.
- [6] LENFELD, Petr. *Strojírenská technologie - vybrané prezentace*. Vyd. 1. V Liberci: Technická univerzita, 2008, 246 s. ISBN 978-80-7372-326-2.
- [7] MACEK, Karel. *Nauka o materiálu*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2002, 209 s. ISBN 80-010-2543-8.
- [8] *Slabé chemické interakce* [online]. [cit. 2013-05-10]. Dostupný z www: [http://fybiomuni.ic.cz/Biostranky/download/04\\_Chemicke\\_interakce.doc](http://fybiomuni.ic.cz/Biostranky/download/04_Chemicke_interakce.doc)
- [9] ADAMIEC, P. *Diplomová práce - Návrh technologie výroby svorkovnice přístroje z plastu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 61 s.
- [10] BORŮVKA, M. *Diplomová práce - Hodnocení vlastností kompozitu s PP matricí a celulóзовým plnivem*. Liberec: TUL. 2012. 92 s.
- [11] SVOBODA, V. *Diplomová práce - Technologie výroby plastového držáku ložisek motoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 81 s.

- [12] STANĚK, Michal. *Modelování procesu tváření polymerů, včetně technologického řešení nástrojů*. Brno: Vědecké spisy VUT v Brně, 2005. 27 s. ISBN 80-214-3025-7
- [13] KROISOVÁ Dora: *Nekovové materiály, Přednáška č. 13: Přírodní materiály*, Katedra materiálu, TUL – FS, [online]. [cit. 2013-05-05]. Dostupný z [www: http://www.technomat.cz/data/katedry/kmt/KMT\\_NEM\\_PR\\_13\\_CZE\\_Kroiso\\_va\\_Prirodni\\_materialy.pdp](http://www.technomat.cz/data/katedry/kmt/KMT_NEM_PR_13_CZE_Kroiso_va_Prirodni_materialy.pdp)
- [14] LIU, Kesong a Lei JIANG. *Bio-inspired design of multiscale structures for function integration*. Nano Today [online]. 2011, vol. 6, issue 2, s. 155-175 [cit. 2013-04-18]. DOI: 10.1016/j.nantod.2011.02.002. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S174801321100017X>
- [15] XUE, Chao-Hua, Shun-Tian JIA, Jing ZHANG a Jian-Zhong MA. *Large-area fabrication of superhydrophobic surfaces for practical applications: an overview*. Science and Technology of Advanced Materials [online]. 2010-06-01, vol. 11, issue 3, s. 033002- [cit. 2013-04-18]. DOI: 10.1088/1468-6996/11/3/033002. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/1468-6996/11/i=3/a=033002?key=crossref.29ee338a58c64a2de51ea43229394ab7>
- [16] BHUSHAN, Bharat, Yong CHAE HUNG a Kerstin KOCH. *Micro-, nano- and hierarchical structures for superhydrophobicity, self-cleaning and low adhesion*. In: CHAE JUNG, Yong. Phil. Trans. R. Soc. A. London: Royal Society Publishing, 2009, s. 1631-1672. [cit. 2013-04-18]. DOI: 10.1098/rsta.2009.0014. Dostupné z: <http://rsta.royalsocietypublishing.org/cgi/doi/10.1098/rsta.2009.0014>
- [17] JIN, M., X. FENG, L. FENG, T. SUN, J. ZHAI, T. LI a L. JIANG. *Superhydrophobic Aligned Polystyrene Nanotube Films with High Adhesive Force: an overview*. Advanced Materials [online]. 2005-08-18, vol. 17, issue 16, s. 1977-1981 [cit. 2013-04-18]. DOI: 10.1002/adma.200401726. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/adma.200401726>
- [18] RON, J. *Diplomová práce - Studium povrchových struktur vybraných přírodních objektů a možnosti vytváření jejich analogií*. Liberec: TUL. 2012. 67 s.
- [19] *Wetting*. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-04-26]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Wetting>
- [20] BARTOVSKÁ, Lidmila. *Fyzikální chemie povrchů a koloidních soustav* [online]. 5. přeprac. vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005, 244 s. [cit. 2013-04-26]. ISBN 80-708-0579-X. Dostupné z: [http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid\\_isbn-80-7080-579-X/pages-img/001.html](http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_isbn-80-7080-579-X/pages-img/001.html)

- [21] *Cohesion, Adhesion, Spreading, and Surfactants*. In: Wilkes University [online]. Wilkes-Barre [cit. 2013-04-13]. Dostupné z: <http://pharmacy.wilkes.edu/kibbeweb/lecture3.html>
- [22] BÁRTKOVÁ H., KLUSOŇ P.: *Stanovení povrchové snášivosti tenkých vrstev a odbourávání povrchově vázaných nečistot*. Ústav organické technologie, VŠCHT Praha, [online]. [cit. 2013-05-08]. Dostupný z www: <http://www.vscht.cz/kot/resources/studijni-materialy/labchcht-001/n150013-b6.pdf>
- [23] KRÁSNÝ, I. *Diplomová práce - Měření kontaktních úhlů smáčení a určování povrchové energie plastů*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. 2010. 126 s.
- [24] YAN, Y.Y., N. GAO, W. BARTHLOTT, T. SUN, J. ZHAI, T. LI a L. JIANG. *Mimicking natural superhydrophobic surfaces and grasping the wetting process: A review on recent progress in preparing superhydrophobic surfaces*. *Advances in Colloid and Interface Science* [online]. 2011, vol. 169, issue 2, s. 80-105 [cit. 2013-05-11]. DOI: 10.1016/j.cis.2011.08.005. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0001868611001552>
- [25] KŘÍŽ, M. *Diplomová práce - Hydrofilita a hydrofobicita jako klíč k řízení vlastností povrchů*. Brno: MASARYKOVA UNIVERZITA. 2009. 70 s.
- [26] <http://www.unipetrolrpa.cz>, 19.05.2013 (Mosten MA 350)
- [27] <http://www.materialdatacenter.com>, 19.05.2013 (ABS NOVODUR 4105)
- [28] <http://grodno-khim.by>, 19.05.2013 (PA6 GRODNAMID)
- [29] <http://www.arburg.com>, 20.05.2013 (Arburg 270s 400-100)

### **Prohlášení:**

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 sb. o právu autorském, zejména § 60 - školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum: 24. května 2013

.....  
Martin Janeba



**Declaration:**

I have been notified of the fact that Copyright Act No. 121/2000 Coll. applies to my thesis in full, in particular Section 60, School Work.

I am fully aware that the Technical University of Liberec is not interfering in my copyright by using my thesis for the internal purposes of TUL.

If I use my thesis or grant a licence for its use, I am aware of the fact that I must inform TUL of this fact; in this case TUL has the right to seek that I pay the expenses invested in the creation of my thesis to the full amount.

I compiled the thesis on my own with the use of the acknowledged sources and on the basis of consultation with the head of the thesis and a consultant.

Date: 24. May 2013

.....  
Martin Janeba